

Thema der Dissertation:

Möglichkeiten und Grenzen von Aufforstung als Beitrag zum  
dezentralen Hochwasserschutz

Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades  
Doctor rerum naturalium (Dr. rer. nat.)

vorgelegt von  
Diplom-Hydrologe Andreas Wahren

Gutachter:

Herr Prof. Dr. Karl-Heinz Feger  
Technische Universität Dresden  
Fakultät Umweltwissenschaften  
Institut für Bodenkunde und Standortslehre  
Lehrstuhl für Standortslehre und Pflanzenernährung

Frau Prof. Dr. Nicola Fohrer  
Christian-Albrechts-Universität zu Kiel  
Institut für Natur- und Ressourcenschutz  
Abteilung für Hydrologie und Wasserwirtschaft

Herr PD Dr. Martin Volk  
Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH - UFZ  
Department Landschaftsökologie  
Leipzig

Tharandt, 11. Februar 2013

## Inhalt

<b>Erklärung des Promovenden .....</b>	<b>3</b>
<b>Danksagung .....</b>	<b>4</b>
<b>1       Einführung .....</b>	<b>6</b>
1.1       Hintergrund und Motivation.....	6
1.2       Zielsetzung .....	8
1.3       Struktur.....	9
<b>2       Zusammenfassende Darstellung der Publikationsinhalte .....</b>	<b>11</b>
2.1       Vorstellung des Modells AKWA-M® .....	11
2.2       Einfluss des Waldes auf bodenhydraulische Eigenschaften.....	12
2.3       Bildung begründeter Waldmehrunngsszenarien .....	13
2.4       Exkurs: Politischer Vollzug in sächsischen Hochwasserentstehungsgebieten ...	14
2.5       Synthese .....	15
<b>3       Schlussfolgerungen .....</b>	<b>16</b>
<b>4       Literatur.....</b>	<b>18</b>

## Anhänge

## Erklärung des Promovenden

Die Übereinstimmung dieses Exemplars mit dem Original der Dissertation zum Thema:

**„Möglichkeiten und Grenzen von Aufforstung als Beitrag zum dezentralen Hochwasserschutz“**

wird hiermit bestätigt.

Ich versichere, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe; die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als diese kenntlich gemacht worden. Bei der Auswahl und Auswertung des Materials sowie bei der Herstellung des Manuskriptes habe ich Unterstützungsleistungen von folgenden Personen erhalten:

Prof. Dr. Karl-Heinz Feger (Betreuer).

Weitere Personen waren an der geistigen Herstellung der vorliegenden Arbeit nicht beteiligt. Insbesondere habe ich nicht die Hilfe eines oder mehrerer Promotionsberater(s) in Anspruch genommen. Dritte haben von mir weder unmittelbar noch mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertation stehen.

Die Arbeit wurde bisher weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde zum Zwecke der Promotion vorgelegt.

Ich bestätige, dass ich die Promotionsordnung der Fakultät Umweltwissenschaften der TU Dresden anerkenne.

Tharandt, .....  
Ort, Datum

.....  
Unterschrift (Vorname Name)

## Danksagung

Die vorgelegte Arbeit wurde inspiriert durch die Mitwirkung in den Projekten:

- Analyse, Bewertung und Umsetzung von Maßnahmen des präventiven Hochwasserschutzes in der Mittelgebirgsregion Jeseniky (Altwater-Gebirge, Tschechische Republik) – gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU-Projekt: 22529 33/2),
- FLOODsite Integrated Flood Risk Analysis and Management Methodologies – 6. EU-Forschungsrahmenprogramm (Kontraktnummer: GOCE-CT-2004-505420),
- Erstellung eines Leitfadens für Ausgleichsmaßnahmen auf landwirtschaftlich genutzten Flächen in Hochwasserentstehungsgebieten - Forschungs- und Entwicklungsvorhaben im Auftrag des Landeshochwasserzentrums (Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie),
- AgroForNet "Nachhaltige Entwicklung ländlicher Regionen durch Vernetzung von Produzenten und Verwertern von Dendromasse für die energetische Nutzung" – gefördert durch den Forschungsschwerpunkt des Bundesministeriums für Bildung und Forschung „Nachhaltiges Landmanagement“

Ein besonderer Dank gilt den Förderinstitutionen, welche mir diese Forschungsarbeiten ermöglicht haben, sowie den Mitarbeitern in den Projektverbünden.

Ich danke meinem betreuenden Hochschullehrer Prof. Dr. Karl-Heinz Feger, der mir immer eine optimale Arbeitsatmosphäre garantierte und fachlich kompetenten Rat gab. Die flexible immer ergebnisorientierte Arbeitsweise erschien mir stets sehr gut zur Entwicklung der eigenen Kreativität. Ich danke Dr. Kai Schwärzel, der stets als inspirierender Diskussionspartner zur Verfügung stand. Der gesamte Lehrstuhl für Standortslehre und Pflanzenernährung hat mich immer unterstützt und ist mir besonders bei Feldeinsätzen und der Ausrichtung von Workshops und Präsentationen hilfreich zur Hand gegangen. Besonderer Dank gilt hierbei Frank Jacob, Rainer Petzold, Dr. Janet Häntzschel, Dr. Karoline Schua, Raphael Benning, Daniel Hawtree, Yvonne Morgenstern, Dr. Ronny Peters, Dr. Stefan Julich und Alexander Menzer.

Die Erstellung der Arbeit wäre nicht möglich gewesen ohne die umfangreiche Mitwirkung der Mitarbeiter der Firma Dr. Dittrich & Partner Hydro-Consult GmbH aus Bannewitz. Ich danke dem Inhaber und langjährigen Geschäftsführer Dr. Ingo Dittrich für die Motivation, aus dem Berufsleben heraus zurück an die Universität zu wechseln und noch mit der Promotion zu



beginnen und die Geduld, die Fertigstellung der Arbeit abzuwarten in einer Zeit, in der viele Interessen auszugleichen waren. Dr. Dittrich war mir zu jeder Zeit ein kritischer Berater, der meine Forschungsüberlegungen sehr bereichert hat. Hervorheben möchte ich auch Dr. Albrecht Münch, der seit vielen Jahren an der ständigen Weiterentwicklung des Modells AKWA-M<sup>®</sup> arbeitet und mir oft unterstützend bei der Modellierung zur Seite stand. Neue Modellmodule konnten auf kurzem Wege unkompliziert umgesetzt und implementiert werden.

Der größte Dank gilt aber in jedem Fall meiner Familie und hier besonders meiner Frau Filipa. In unserer harmonischen Kombination aus Privat- und Arbeitsleben schöpfe ich viel Kraft und Inspiration und habe eine völlig neue Begeisterung für unsere wissenschaftliche Tätigkeit erfahren.

# 1 Einführung

## 1.1 Hintergrund und Motivation

Die Europäische Union hat sich nach den verschiedenen großen Hochwässern in den vergangenen 15 Jahren überall in Europa (z.B. Oder 1997, Elbe 2002) die Aufgabe gestellt, den Hochwasserschutz neu zu ordnen. Die neu geschaffenen rechtlichen Rahmenbedingungen wurden mit der EU Hochwasserrichtlinie (EC 2007) am 25.4.2007 vom Europäischen Parlament verabschiedet und haben das Ziel:

*„...Hochwasser und dessen negative Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit sowie auf Umwelt, Infrastrukturen und Eigentum zu vermeiden und zu begrenzen.“ (BMU 2009)*

Die aktuell in der Umsetzung befindliche Richtlinie sieht dabei drei Stufen vor. Diese sind die vorläufige Bewertung des Hochwasserrisikos aller Flusseinzugsgebiete, die Erstellung von Gefahren- und Risikokarten für alle Gebiete mit einem echten Hochwasserrisiko und die Erstellung von Hochwasserrisiko-Managementplänen (HWRMP) für diese Gebiete. Bis Ende des Jahres 2015 sollen diese HWRMP mit Schwerpunkt auf Vermeidung, Schutz und Vorsorge erstellt und veröffentlicht sein. Teil dieses Hochwasserrisiko-Managements sind im Sinne der Richtlinie auch Maßnahmen wie nachhaltige Flächennutzungssysteme und Verbesserung des Wasserrückhalts (BMU 2009).

Maßnahmen, welche das Wasserrückhaltepotential in der Fläche erhalten oder verbessern können, wurden in den vergangenen Jahren europaweit in vielen Forschungsprojekten untersucht (z.B. NAEF ET AL. 2000, O'CONNELL ET AL. 2004, FAO 2005, KEESSTRA 2006, SMUL 2007, WAHREN ET AL. 2008, 2011, SCHMIDT ET AL. 2008, SEELING ET AL. 2009, SAMUELS 2009a,b, BATHURST ET AL. 2011). Wirksam im Sinne des Hochwasserschutzes sind solche Maßnahmen, die zu einer Erhöhung der Wasserspeicherung im Einzugsgebiet und/oder zur Verzögerung des Abflusses aus dem Einzugsgebiet beitragen. Aufforstungsmaßnahmen zeigen hier ein gutes Potential wurden aber in der Vergangenheit hinsichtlich ihrer Wirksamkeit für den Hochwasserschutz kontrovers diskutiert (z.B. SMUL 2003, HEGG 2006, BRADSHAW ET AL. 2006, NISBET U. THOMAS 2006, LAURANCE 2007, CALDER ET AL. 2007, LORZ ET AL. 2007, SCHMIDT ET AL. 2008). Einen Überblick über den Stand des Wissens der Wirkung von Wald auf Hochwässer liefern die Arbeiten von CALDER U. AYLWARD 2006 oder NISBET ET AL. 2011. Eine allgemeine Zusammenfassung zur Wirkung der Landnutzung auf Hochwasserentstehung geben O'CONNELL ET AL. 2004.

Die Wirkung einer Aufforstungsmaßnahme kann aufgrund ihrer Langwierigkeit nur schwer in der Natur beobachtet werden. Die Bewertung unterschiedlicher Landnutzungsoptionen ist auf diesem Wege ausgeschlossen. Die genannten Studien nutzen deshalb räumlich verteilte Niederschlags-Abflussmodelle zur Beschreibung der Effekte oder beobachten vergleichbare Einzugsgebiete mit unterschiedlichem Waldanteil. Beim Einsatz hydrologischer Modelle ist die Parametrisierung der Landnutzungsänderung der kritische Punkt. Beim Vergleich zweier Einzugsgebiete unterscheiden sich diese meist nicht nur hinsichtlich ihrer Landnutzungsverteilung. Die Skalen, auf der eine veränderte Landnutzung wirkt und auf der deren Wirkung auf ein Hochwasserereignis bewertet wird, unterscheiden sich zusätzlich. Dies erschwert die Wahl eines geeigneten Modell- bzw. Beobachtungskonzeptes.

Die genannten Untersuchungen ziehen folgende Schlussfolgerungen:

- die Landnutzungsform Wald bietet meist einen höheren Wasserrückhalt als andere Landnutzungen. Gründe sind höhere Infiltration, höherer Wasserverbrauch und größere Oberflächenrauigkeit besonders in den Auebereichen.
- Eine daraus entstehende Reduktion von Hochwässern konnte hauptsächlich für kleine und mittlere Hochwässer in kleinen und mittleren Flusseinzugsgebieten (< 100 km<sup>2</sup>) nachgewiesen werden.
- Der Einfluss auf extreme Ereignisse bzw. in großen Flusseinzugsgebieten wird angezweifelt oder kann zumindest nicht zweifelsfrei bewiesen werden. Dies wird zum einen auf die Datenlage zurückgeführt, zum anderen auf den Entwicklungsbedarf der Modelle, da noch nicht alle relevanten Prozesse verstanden bzw. beschrieben sind, die mit einer Landnutzungsänderung hin zu Wald einhergehen.

Weiterhin ist zu beachten, dass unterschiedliche Waldbewirtschaftung, insbesondere Baumartenwahl und Waldstruktur, einen erheblichen Einfluss auf die Entstehung bzw. Retention von Hochwasser haben (z.B. SCHÜLER ET AL. 2007). Gerade hier besteht noch weiterer Forschungsbedarf (vgl. PILAŠ ET AL. 2010).

Studien, welche sich mit der Modellierung von Landnutzungseffekten auf Hochwässer beschäftigen, mahnen stets die Verbesserung der Modelle hinsichtlich ihrer Beschreibung von Nutzungsänderungen an (z.B. NIEHOFF ET AL. 2002, O'CONNELL ET AL. 2004, FOHRER ET AL. 2005). Hier soll die vorliegende Arbeit einen Beitrag leisten, gekoppelte Wasserhaushalts- und Niederschlags-Abflussmodelle (WHH- und N-A-Modelle) hinsichtlich der Parametrisierung von Landnutzungsänderung hin zu Wald zu verbessern. Der Fokus lag hierbei auf der Beschreibung der landnutzungsspezifischen räumlich verteilten Vorfeuchte sowie des Einflusses von Aufforstungen auf bodenphysikalische Eigenschaften und bei der Nutzbar-

machung der Modellergebnisse für die Umsetzung. Das heißt zum einen die Kommunikation mit anderen Wissenschaftsdisziplinen zur Ableitung übergreifende Lösungsansätze und zum anderen auch der Kontakt zu den Entscheidungsträgern, welche für die Umsetzung von Hochwasserschutzmaßnahmen in der Fläche zuständig sind.

Die modellhafte Beschreibung von Landnutzungsänderungen ist für die Landschaftsplanung ein unverzichtbares Werkzeug. Die eingangs benannten Hochwasserrisiko-Managementpläne sind nur ein Teil der planerischen Konzepte, welche die zukünftige Landnutzungsverteilung mit bestimmen. In zunehmendem Maße müssen transdisziplinäre Ansätze komplexe Landschaftsfunktionen und die daraus resultierenden Ökosystemdienstleistungen ganzheitlich bewerten. Der wachsende Druck auf die Nutzung der Landschaftssysteme (z.B. für Bioenergie, Ernährung, Infrastruktur) sowie die Anpassung an ein verändertes Klima sind weitere Treiber eines immer dynamischeren Landnutzungswandels, welcher vorausschauend und ausgleichend geplant werden muss.

## 1.2 Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist es, die Abbildbarkeit von Landnutzungsänderungen hin zum Wald für hydrologische Modelle zu hinterfragen und Verbesserungen vorzuschlagen. Hierbei stand die Nutzung der Ergebnisse für Umsetzungsfragestellungen im Vordergrund. Die Untersuchungen fanden dabei im Einzugsgebiet der Schwarzen Pockau (50°40' N, 13°10' O) und im Zellwald bei Siebenlehn (51°01' N, 13°18' O) statt.

Dabei wird folgenden Thesen nachgegangen:

- Landnutzungsänderungen hin zu Waldnutzung führen zu Veränderungen in der Bodenmatrix (Porenverteilung, hydraulische Leitfähigkeit) – dabei ist nicht nur die Zunahme der Makroporen gemeint.
- Die heutige Landnutzungsverteilung (streng genommen im Untersuchungsgebiet) bietet ein Abbild der bodenbedingten Standortverhältnisse. Waldflächen befinden sich hauptsächlich auf Böden, welche für die Landwirtschaft ungeeignet sind (z.B. wegen Staunässe, Hanglage, geringe nutzbare Feldkapazität). Ein Vergleich von gemessenen Hochwasserabflüssen aus bewaldeten und nicht bewaldeten Einzugsgebieten kann somit nur in seltenen Fällen allein Aufschluss über den Effekt des Waldes bringen.
- Hochwässer sind Einzelereignisse, die auch von den Vorbedingungen abhängen. Besonders die Vorfeuchte im Boden und die daraus resultierende Fähigkeit des Bodens, Wasser aufzunehmen und zu speichern ist stark von der Landnutzung

abhängig. N-A-Modelle können mit einer vorgeschalteten WHH-Modellierung diesen Effekt raumverteilt abbilden.

- Realistische Landnutzungsszenarien müssen transdisziplinär erarbeitet werden. Das Verständnis darüber,
  - welches Potenzial es überhaupt für eine Waldmehrung gibt auch unter der Berücksichtigung anderer Interessen außer dem Hochwasserschutz und
  - welche Informationen aus der Modellierung des „Wald-Effektes“ auf die Entstehung von Hochwässern für die Landschaftsplanung wichtig sind,

verbessert die Nachvollziehbarkeit und die Kommunizierbarkeit von Modellergebnissen und erhöht die Akzeptanz vorgeschlagener Maßnahmen im Rahmen der Landschaftsplanung.

### 1.3 Struktur

Die vorliegende Arbeit ist als kumulative Dissertation verfasst. Sie umfasst insgesamt fünf wissenschaftliche Aufsätze: drei Publikationen in zwei internationalen Zeitschriften mit Review-Prozess sowie einen Beitrag in einer nationalen Zeitschrift mit Begutachtungssystem und einen gutachterlich geprüften internationalen Buchbeitrag.

Publikation 1:

**WAHREN A., SCHWÄRZEL K., FEGER K.H., MÜNCH A., DITTRICH I. (2007): Identification and model based assessment of the potential water retention caused by land-use changes, *Advances in Geoscience* 11: 49–56.**

In diesem Aufsatz wird das angewendete Modell (AKWA-M<sup>®</sup>) vorgestellt. Mit einem ersten Landnutzungsszenario für das Einzugsgebiet der Schwarzen Pockau (vollständige Bewaldung) werden Fragen der Modellierbarkeit von Landnutzungseffekten diskutiert.

Publikation 2:

**WAHREN A., SCHWÄRZEL K., FEGER K.H., MÜNCH A. (2009): Land-use effects on flood generation – considering soil hydraulic measurements in modelling, *Advances in Geoscience* 21: 99–107.**

Diese Arbeit befasst sich mit dem Einfluss eines aufwachsenden Waldbestandes auf bodenphysikalische Eigenschaften. Die Modellsensitivität bei

Berücksichtigung und Vernachlässigung der bodenphysikalischen Veränderungen wird beleuchtet und die Generalisierbarkeit der Ergebnisse diskutiert.

Publikation 3:

**WAHREN A., FEGER K.H. (2010): Model-Based Assessment of Forest Land Management on Water Dynamics at Various Hydrological Scales – A Case Study, in: Bredemeier, M.; Cohen, S.; Godbold, D.L.; Lode, E.; Pichler, V.; Schleppi, P. (Eds.): Forest Management and the Water Cycle - An Ecosystem-Based Approach, Ecological Studies 212, Springer: 453-469.**

Dieses Buchkapitel versucht in einem „straight-forward-approach“ die Ergebnisse der ersten zwei Publikationen mit sozioökonomischen Fragestellungen zu koppeln und daraus realistische Landnutzungsszenarien abzuleiten. Ziel ist es, die Umsetzbarkeit einer Waldmehrung zum Hochwasserschutz unter unterschiedlichen gesellschaftlichen Rahmenbedingungen zu bewerten. Dabei werden auch weitergehende Fragen des Gebietswasserhaushaltes und möglicher zukünftiger Klimaänderungen beleuchtet.

Publikation 4:

**WAHREN A., FRANK S., WALTHER P., SCHMIDT W., FEGER K.H. (2011): Erstellung eines Leitfadens für Ausgleichsmaßnahmen auf landwirtschaftlich genutzten Flächen in den Hochwasserentstehungsgebieten Sachsens, Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 55: 155-165.**

Dieser Aufsatz hat den stärksten Praxisbezug aller Publikationen dieser Arbeit. Für die sächsische Landeshochwasserzentrale wurde ein Leitfaden erstellt, der für die Hochwasserentstehungsgebiete des Freistaates Sachsen (ein in Deutschland einzigartiger Schutzstatus) die Bewertung von landwirtschaftlichen Ausgleichsmaßnahmen bei Eingriffen in das Wasserretentionspotenzial vornimmt. Die unterschiedlichen administrativen Zuständigkeiten machten es jedoch nicht möglich, Aufforstung als tatsächliche Maßnahme in diesem Leitfaden zu integrieren. Als praktisches Beispiel hinsichtlich der Umsetzbarkeit veranschaulicht dieser Aufsatz jedoch, wo Probleme beim politischen Vollzug abseits der wissenschaftlichen Beweisführung liegen können.

Publikation 5:

**WAHREN A., SCHWÄRZEL K., FEGER K.H. (2012): Potentials and limitations of natural flood retention by forested land in headwater catchments: evidence from experimental and model studies, J. Flood Risk Management 5: 321–335.**

Dieser abschließende Artikel greift noch einmal die Modellierung des „Wald-Effektes“ auf die Entstehung von Hochwässern auf. Dabei geht es besonders um die Ausprägung des zusätzlichen Wasserrückhaltes bei Einzelereignissen und die Kommunikation der komplexen Ergebnisse, die von der Niederschlagscharakteristik, der vorangegangenen Witterung, der Größe der aufgeforsteten Fläche im Einzugsgebiet und dem Bewertungspunkt für die Hochwasserminderung abhängen. Zusammenfassend werden Auswirkung für Landmanagement und Landschaftsplanung diskutiert.

## 2 Zusammenfassende Darstellung der Publikationsinhalte

### 2.1 Vorstellung des Modells AKWA-M<sup>®</sup>

Für die Publikationen (vgl. Kap. 1.3) wurde das gekoppelte WHH- und N-A-Modell AKWA-M<sup>®</sup> (MÜNCH 2004) angewendet und Modifikationen vorgeschlagen, die im Laufe der Promotionszeit durch den Modellentwickler umgesetzt wurden. Das Modell wurde auch in anderen Projekten zur Modellierung von Waldmehrszenarien im Hinblick auf die Hochwasserentstehung eingesetzt (vgl. SONNEMANN ET AL. 2008).

Bei der Modellierung von Hochwässern erfolgt die Kalibrierung der N-A-Modelle meist ausschließlich am gemessenen Abfluss an Flusspegeln. Je nach physikalischen Detaillierungsgrad der Prozessbeschreibung im Modell können zusätzliche Daten (z.B. Bodenfeuchtemessungen, Infiltrationsmessungen) mit herangezogen werden. Szenarienfähig bleiben die Modelle nur, wenn die Parameter innerhalb des Kalibrierungsprozesses nicht ihren physikalischen Bezug verlieren. Das heißt beispielsweise, Bodenparameter, welche aufgrund eines physikalischen Hintergrundes abgeleitet wurden (z.B. gemessene Wasserretention oder Feldkapazität aus einem Karten-/Tabellenwerk) dürfen nur innerhalb enger plausibler Bereiche für die Kalibrierung variiert werden. Üblicherweise werden in den N-A-Modellen zur Beschreibung von Landnutzungsänderungen lediglich Vegetationsparameter variiert (z.B. Wurzeltiefen, Blattflächenindex). Änderungen der Bodenstruktur, die mit der Landnutzung einhergehen (z.B. SCHWÄRZEL 2011, SCHWÄRZEL ET AL. 2011, LANGE ET AL. 2010), bleiben in den meisten Modellanwendungen zur Landnutzungsänderungsbewertung unberücksichtigt bzw. beschränken sich auf die Erhöhung des Makroporenanteils.

Das Modell wird in **Publikation 1** (WAHREN ET AL. 2007) vorgestellt. Es wurde für diese Arbeit für den Wasserhaushalt kalibriert (Zeitperiode: 1980 – 2005). Im Anschluss wurden 10

Hochwasserereignisse (zwischen 1993 und 2005; zeitliche Auflösung 1 h) für die Kalibrierung und Validierung des N-A-Modells genutzt. Dabei war es zu diesem Zeitpunkt der Modellentwicklung noch sehr aufwendig, unterschiedliche landnutzungsabhängige Vorfeuchtezustände räumlich verteilt für die Hochwassermodellierung zu nutzen. Diese wurden von Hand aus der Wasserhaushaltsmodellierung übernommen und an die N-A-Modellierung übergeben. Im Laufe der weiteren Bearbeitung wurde im Modell das direkte Abgreifen des Vorfeuchtezustandes eines gewählten Tages innerhalb der Wasserhaushaltsmodellierung automatisiert. Dieser Zustand kann dann als Initialzustand der N-A-Modellierung genutzt werden. In der Publikation wurden für zwei historische Niederschlagsereignisse (eins mit mittlerer und eins mit extremer Niederschlagsmenge) und zwei Landnutzungsverteilungen (Ist-Zustand und vollkommene Bewaldung) Hochwasserabflüsse simuliert. Dabei wurde der Boden der in Wald umgewandelten Flächen wie folgt geändert:

- Zusätzliche organische Auflage über dem Mineralboden
- Zunahme der Makroporen
- Zunahme des Gehalts an organischer Bodensubstanz und Abnahme der Lagerungsdichte der oberen Bodenhorizonte - daraus resultierend Änderung der Parameter (permanenter Welkepunkt, PWP, Feldkapazität, FK und Gesamtporosität,  $n$  – nach Angaben in AD-HOC-AG BODEN, 2005)

Als wesentliche Erkenntnis aus Publikation 1 ist zu benennen, dass die landnutzungsbeeinflusste Vorfeuchte und Infiltration räumlich verteilt abgebildet werden können. Prinzipiell werden die in Kap. 1.1 beschriebenen Ergebnisse anderer Forschungsprojekte bestätigt (Limitierung des Waldeinflusses in Abhängigkeit von Niederschlagsmenge), auch wenn hier für ein unrealistisches Landnutzungsszenario (vollkommene Bewaldung) auch für ein Einzugsgebiet  $> 100 \text{ km}^2$  für ein Ereignis mit einem Wiederkehrintervall von 5 Jahren eine Hochwasserscheitelreduktion von 20 % errechnet wurde. Die Annahmen hinsichtlich der veränderten Bodeneigenschaften sollten experimentell einmal überprüft werden. Hinsichtlich der Szenarienbildung sollte geprüft werden, wie realistische Aufforstungsszenarien erstellt werden können und welche Möglichkeiten der Umsetzung bestehen.

## 2.2 Einfluss des Waldes auf bodenhydraulische Eigenschaften

Den veränderten Bodeneigenschaften wird in der **Publikation 2** nachgegangen. Wie in Kap. 1.1 beschrieben ist die Messung der tatsächlichen Änderung bodenphysikalischer Eigenschaften unter einem aufwachsenden Waldbestand nur mit hohem Aufwand umsetzbar. In der Arbeit wurde daher das Konzept der "unechten Zeitreihe" genutzt. Besonders aufwendig



war die Suche nach einem geeigneten Standort für die Untersuchung. Im Zellwald bei Siebenlehn (Sachsen) konnte ein Standort gefunden werden, bei dem ein Ackerstandort an einen mittlerweile vor 9 Jahren aufgeforsteten Waldstandort grenzt (6 Jahre zum Zeitpunkt der Untersuchung). Unmittelbar daneben befindet sich ein Waldstandort, dessen Aufforstung ca. 50 Jahre zurückliegt, neben einem Standort der vermutlich immer in Waldnutzung war. Es konnten signifikante Unterschiede in den bodenphysikalischen Eigenschaften sowohl im Feld als auch im Labor ermittelt werden. Das Modell reagiert auf diese Unterschiede sensitiv. Die Unterschiede waren sogar größer als die mit den in Publikation 1 getroffenen Annahmen.

Diese Studie verdeutlicht, dass dem Boden bei der Wasserspeicherung eine Schlüssel-funktion zukommt. Durch die Landnutzungsänderung erfolgt auch eine Änderung der Bodeneigenschaften (schon wenige Jahre nach der Implementierung) und diese kann bei der Bewertung des Hochwasserrückhaltes nicht vernachlässigt werden. Die größten Unterschiede treten dabei im Oberboden auf; mit zunehmender Tiefe werden die Unterschiede geringer.

Eine generelle Übertragbarkeit der Ergebnisse kann mit diesem einen Experiment nicht bewiesen werden. Weitere methodisch vergleichbare Untersuchungen auf anderen Böden wären daher wünschenswert. Die Vorgehensweise zur modellhaften Beschreibung der Bodenänderungen im Modell AKWA-M<sup>®</sup> beschreibt wahrscheinlich nur einen Teil der noch weitergehenden Modifikation. Ein interessanter Aspekt dieser Untersuchung war, dass der Waldstandort schlechtere Wasserrückhaltebedingungen aufwies als der Standort, welcher vor 50 Jahren aufgeforstet wurde. Hier herrschte im Boden eine stärkere Pseudovergleyung, welche wahrscheinlich auch zu einer höheren Staunässebildung führt. Möglicherweise war dieser Standort deshalb niemals als Ackerstandort attraktiv. Wesentliche Vorarbeit für diese Untersuchung wurde in den Diplomarbeiten LEHMANN (2008) und FRENZEL (2007) geleistet.

## 2.3 Bildung begründeter Waldmehrszenarien

Trotz der genannten Unsicherheiten bei der Parametrisierung der hydrologischen Modelle und somit bei der wissenschaftlichen Beweisführung sind Aufforstungsmaßnahmen schon in Gesetzestexten als hochwassermindernd festgeschrieben (SächsWG 2004). **Publikation 3** geht vor diesem Hintergrund daher der Frage nach, unter welchen gesellschaftlichen Randbedingungen tatsächlich signifikante Erhöhungen des Waldanteils in einem Teilgebiet des Einzugsgebiets der Schwarzen Pockau möglich sind. Deren Einfluss auf die Entstehung von Hochwässern wird unter Nutzung der in den Publikationen 1 und 2 gewonnenen Erkenntnisse bewertet. Es zeigt sich, dass aus heutiger Sicht von den Eigentümern meist nur Grenzertragsflächen für die Aufforstung zur Verfügung gestellt werden können. Übersetzt man

unterschiedliche Zukunftsentwicklungsmöglichkeiten in das Verhalten der Flächeneigentümer, ergeben sich unterschiedliche begründete Landnutzungsverteilungen mit unterschiedlichem Waldanteil. Dieser integrierende Modellierungsansatz zeigte, dass die wahrscheinlichsten Zukunftsszenarien die geringste Tendenz zur Waldmehrung aufweisen. Größere Waldmehrungen sind bei Zukunftsszenarien möglich, die lokale Strukturen und Gemeinwesen prononcieren. Weitere Aspekte dieser Publikation beleuchten Auswirkungen, die mit ebenfalls aus der Waldmehrung resultieren aber über die isolierte Betrachtung des Hochwasserschutzes hinausgehen. So sinkt mit zunehmendem Waldanteil durch den stärkeren Wasserverbrauch auch der mittlere Gebietsabfluss. Für prognostizierte Klimaänderungen (z.B. Temperaturerhöhung, Niederschlagsabnahme) verschärft sich dieser Effekt noch. Allerdings wird deutlich, dass der Einfluss der Landnutzung auf den Hochwasserrückhalt bei diesen Klimaprognosen im Untersuchungsgebiet zunimmt. Deutliche Erkenntnis dieser Untersuchung ist, dass eine losgelöste Betrachtung des Hochwasserschutzes bei der Landschaftsplanung nicht zweckdienlich ist. Waldmehrung, will sie einen Einfluss auf die Hochwasserentstehung haben, muss von den Flächeneigentümern akzeptiert sein. Außerdem muss sie Eingang in die europäische Agrarflächenförderung finden und vor allem bei der Bewertung andere Landschaftsfunktionen des Waldes mit berücksichtigen. Besonderen Anteil bei der Szenarienentwicklung hatte die Masterarbeit RÖMER (2007).

## **2.4 Exkurs: Politischer Vollzug in sächsischen Hochwasserentstehungsgebieten**

Noch deutlicher wird der Einfluss der Flächennutzungsrestriktionen in **Publikation 4**. Gemeinsam mit der sächsischen Landeshochwasserzentrale wurde ein Vorgehen entwickelt, welches landwirtschaftliche Kompensationsmaßnahmen in den Hochwasserentstehungsgebieten des Freistaates Sachsen (HWEG - SÄCHSWG 2004, vgl. auch WENDEL ET AL. 2008) bewertet. Im Falle einer unvermeidlichen Verschlechterung des Wasserrückhaltevermögens in einem Hochwasserentstehungsgebiet fordert das SÄCHSWG (2004) eine Kompensation auf einer anderen Fläche im selben Hochwasserentstehungsgebiet. Für die Flächenvorauswahl wurde eine Matrix zur Bewertung einer Nutzungsänderung im Sinne des Hochwasserschutzes erarbeitet. Nach dieser Vorauswahl soll eine Kombination aus Standortanalyse und Modellanwendung zum einen die Verschlechterung der in Anspruch genommenen Flächen zum anderen die Erhöhung des Wasserrückhaltepotenzials der Kompensationsfläche ermitteln. Kontrollmessungen dienen der Beweissicherung nach der Nutzungsänderung. Aufgrund der behördlichen Vorgaben bei der Erstellung der Auftragsstudie konnten nur Acker- und Gründlandnutzungen miteinander verglichen werden. Aufforstung,

welche auch den rechtlichen Status der Fläche ändern würde, wurde für den behördlichen Vollzug als zu schwierig umsetzbar angesehen. Aufforstungsmaßnahmen konnten deswegen nur im begleitenden Text berücksichtigt werden. Lediglich die rechtlich Neubewerteten Energiegehölze (Kurzumtriebsplantagen) konnten in die Bewertung mit einfließen. Die Erkenntnis aus dieser Praxisanwendung der Untersuchungsergebnisse zum Landnutzungseinfluss auf die Hochwasserentstehung ist, dass ein integrierender Hochwasserschutz noch durch sektorale Zuständigkeiten eingeschränkt ist. Die Forderung der Europäischen Hochwasserrichtlinie (EC 2007), eine einzugsgebietsbezogene Denkweise zu verfolgen, ist noch nicht durchgehend Bestandteil der behördlichen Praxis.

## 2.5 Synthese

In **Publikation 5** werden die gesammelten Erkenntnisse der Projektarbeiten und der vorangegangenen Publikationen zusammengeführt. Dabei wird stark auf die unterschiedliche Wahrnehmung und den kontrovers diskutierte Einfluss des Waldes auf den Hochwasserrückhalt eingegangen. Die Modellierung der Publikationen 1 bis 3 wird genutzt, um die Ereignisspezifika einzelner Hochwässer zu erläutern. Mit Blick auf die Vorfeuchtebedingungen im betrachteten Einzugsgebiet, welche aus der Witterung vor dem Hochwasserereignis und der Landnutzungsverteilung auf den entsprechenden Böden resultieren, zeigt sich, dass durch die Aufforstung zusätzlicher Wasserrückhalt entsteht. Dies gilt für Zeiträume, in denen Prozesse wie Verdunstung und Interzeption auch für einen stärkeren Wasserverbrauch sorgen können und die Vorwitterung nicht sämtlichen Speicher im Boden schon mit Wasser gefüllt hat. Es wird darauf eingegangen, dass es sich bei Aufforstungsmaßnahmen immer um die Reduzierung der anthropogenen Störung im Niederschlags-Abflussverhalten eines Einzugsgebiets handelt. Die Wasserretention bleibt wie in jedem naturbelassenen Einzugsgebiet limitiert. Hochwässer gehören zum gesunden Regime eines natürlichen Gewässers.

Im Weiteren gibt Publikation 5 Hinweise zu weiteren Schutzzielen (z.B. Bodenschutz, Wasserqualität), die von zusätzlichen Waldflächen begünstigt werden - auch mit Blick auf die Europäische Wasserrahmenrichtlinie (EC 2000). Ein wesentlicher Mangel besteht allerdings darin, verfügbare Flächen für Aufforstungsvorhaben zu finden, trotz des bereits im Gesetzestext verankerten Hinweises auf die hochwasserreduzierende Wirkung. Hier wirken die Werkzeuge der europäischen Agrarflächenförderung noch sehr sektoral (getrennt für Landwirtschaft und Wald). Möglichkeiten der Überwindung dieser Abgrenzung ergeben sich eventuell aus dem Anbau von Energiegehölzen. Ob die Anbau- und Erntetechniken jedoch den Wasserrückhalt in der Landschaft begünstigen, bleibt Gegenstand zukünftiger Forschung. Die wesentliche Erkenntnis von Publikation 5 ist daher, dass es einen großen

Bedarf an integriertem Landmanagement gibt, welches die konkurrierenden Land- und Wassernutzungsansprüche vorausschauend ausbalanciert.

### **3 Schlussfolgerungen**

Wald weist gegenüber anderen Landnutzungen meist die günstigeren Wasserrückhalteigenschaften auf. Diese sind jedoch begrenzt. Ob zusätzlicher Wald in einem Einzugsgebiet zur Reduktion eines Hochwassers führt, hängt ab von der Vorwitterung, den Eigenschaften des Bodens, auf dem die Aufforstung etabliert wurde, Dauer und Intensität des hochwasserauslösenden Niederschlagsereignisses und Lage und Größe der Aufforstungsfläche im betrachteten Einzugsgebiet. Weiterhin spielt das Waldmanagement, welches in dieser Arbeit nur am Rande diskutiert wurde, eine bedeutende Rolle. Bei der Umwandlung einer anderen Landnutzung in Wald sind noch nicht alle Prozesse, die den Wasserrückhalt betreffen, ausreichend untersucht und beschrieben. Dies gilt besonders für die Änderungen in der hydraulischen Architektur der Böden. Es wurde dargestellt, dass aufwachsende Wälder schon nach wenigen Jahren die Porenverteilung besonders in den oberen Bodenhorizonten verändern. Obwohl experimentelle Felduntersuchungen besonders durch die Suche nach geeigneten Teststandorten schwierig sind, wären weitere Messergebnisse von anderen Böden mit anderen Baumarten hier wünschenswert. Eine modellhafte Beschreibung einer Landnutzungsänderung hin zu Wald in Bezug auf den Hochwasserrückhalt ist demnach mit hohen Unsicherheiten behaftet. Modelle bleiben dennoch die einzige Möglichkeit, Auswirkungen von Landnutzungsänderungen mit vertretbarem Aufwand quantifizierend abzuschätzen.

Allgemein gilt bei der Anwendung hydrologischer Modelle zur Prognose von Auswirkungen veränderter Landnutzungen, dass bislang wenig quantitativ verwertbares Wissen über Änderungen im Boden besteht. Weder der Zielzustand noch der Verlauf der Transformation können hier sicher prognostiziert werden. Vernachlässigt man aber solche Prozesse, dürfen bei einer Ergebnisdiskussion auch nur die berücksichtigten Prozesse angeführt werden. Die Weiterentwicklung der Modelle mit gezielter paralleler Datenerhebung ist hier unabdingbar. Die zunehmenden Fragestellungen hinsichtlich veränderter Landnutzungssysteme erfordern auch innovative Formen der Parametrisierung und Kalibrierung der Modelle. Der zunehmende Grad an Prozessabbildungen in den Modellen darf die Parametrisierbarkeit nicht unmöglich machen. Eine adäquate Prozessabbildung ist jedoch der Schlüssel für die szenarienfähige Modellierung. Die Kommunikation der Ergebnisse muss deshalb eine hohe Transparenz mit der Benennung aller bekannten Unsicherheiten aufweisen, da Ent-

scheidungen in der Landnutzung Konsequenzen über sehr lange Zeiträume hinweg nach sich ziehen.

Die qualifizierte Prognose von Landnutzungsänderungen ist eine disziplinübergreifende Aufgabe. Hier wirken soziologische, ökonomische und ökologische Prozesse zusammen, deren Resultat die zukünftige Landnutzung ist. Eine weitere wichtige Schlussfolgerung der vorliegenden Arbeit ist daher, dass für die Umsetzung von Maßnahmen, zur Erhöhung des Wasserrückhaltes, wie hier der Aufforstung, ein breiter wissenschaftlicher und gesellschaftlicher Konsens herrschen muss. Es braucht integrierte Ansätze zur disziplinübergreifenden Beschreibung von Auswirkungen veränderter Landnutzung. Trotz aller Unsicherheiten bei der wissenschaftlichen Beweisführung wird erwartet, dass bis zur Umsetzung der Hochwasserrisiko-Managementpläne „nachhaltige Flächennutzungen“ zur „Verbesserung des Wasserrückhaltes“ definiert sind. Besonders für die politischen Entscheidungsträger ist zur Entwicklung geeigneter Steuerelemente festzuhalten, dass Hochwasserschutzmaßnahmen in der Fläche ihre hauptsächliche Wirkung nicht am Punkt der Implementierung entfalten, sondern erst weiter flussabwärts. Daher sind die bisherigen Förderinstrumente der EU-Agrarflächenförderung für den Hochwasserschutz in der Fläche nahezu nicht anwendbar. Es gilt hier sektorales Denken zu überwinden. Unterschiedliche Ansprüche an Landnutzungssysteme sind durch Lösungsansätze auszubalancieren, die die unterschiedlichen Landschaftsfunktionen berücksichtigen, von denen Wasserrückhalt ein Teil sein kann. Andere Schutzziele wie Naturschutz, Bodenschutz, Ziele der Wasserrahmenrichtlinie, Fragen eines ästhetischen Landschaftsbildes und nicht zuletzt Fragen der wirtschaftlichen Ansprüche an die einzelnen Flächen spielen hier eine wichtige Rolle. Bei der Entwicklung begründeter Zukunftsszenarien ist diese transdisziplinäre Herangehensweise unbedingt zu empfehlen.

Hochwasserschutz kann aber nicht die Aufgabe haben, Hochwasserereignisse vollkommen auszuschließen. Schon heute ist bekannt, dass das Ausbleiben kleiner und mittlerer Hochwässer ökologische Konsequenzen hat. Vielmehr könnte in Gebieten, wie dem hier untersuchten, eine Erhöhung des Waldanteils dazu beitragen, die anthropogenen Störungen zu reduzieren und den Wasserrückhalt dahingehend zu erhöhen, dass hochwasserverschärfende Eingriffe in den Einzugsgebieten zurückgebaut werden.

## 4 Literatur

- BATHURST J.C., BIRKINSHAW S.J., CISNEROS F., FALLAS J., IROUMÉ A., ITURRASPE R., GAVIÑO NOVILLO M., URCIUOLO A., ALVARADO A., COELLO C., HUBER A., MIRANDA M., RAMIREZ M., SARANDÓN R. (2011): Forest impact on floods due to extreme rainfall and snowmelt in four Latin American environments 2: model analysis. *Journal of Hydrology* 400: 292–304.
- AD-HOC-AG BODEN (2005): *Bodenkundliche Kartieranleitung (KA5)*, Hrsg.: Bundesanstalt für Geowissenschaften in Zusammenarbeit mit den staatlichen geologischen Diensten der Bundesrepublik Deutschland, 5. Auflage, Hannover, Germany.
- BMU – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2009): Europäisches Parlament verabschiedet EU-Hochwasserrisikomanagementrichtlinie (EU-HWRM-RL), Stand: Januar 2009, <http://www.bmu.de/binnengewaesser/gewaesserschutzrecht/europa/doc/37811.php>, (abgerufen am 27.12.2012).
- BRADSHAW C. J. A., SODHI N. S., PEH K. S.-H., BROOK B. W. (2007): Global evidence that deforestation amplifies flood risk and severity in the developing world. *Global Change Biology* 13: 2379–2395.
- CALDER I.R., AYLWARD B. (2006): Forest and Floods, *Water International* 31: 87-99.
- CALDER I.R., SMYLE J., AYLWARD B. (2007): Debate over flood-proofing effects of planting forests, *Nature* 450: 945.
- EC – Council of European Communities (2000): Directive of the European Parliament and of the Council (2000/60/EC), *Official Journal of the European Union*, L 288/27.
- EC – Council of European Communities (2007): Directive of the European Parliament and of the Council (2007/60/EC), *Official Journal of the European Union*, OJ L 327.
- FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UN (2005): *Forests and Floods – Drowning in Fiction or Thriving on Facts?*, RAP Publication 2005/03 Forest Perspectives 2, Published by Center for International Forestry Research Food and Agriculture Organization of the United Nations; 40 S. ISBN 979-3361-64-6, <http://www.fao.org/docrep/008/ae929e/ae929e00.htm> (abgerufen 27.12.2012).
- FOHRER N., HAVERKAMP S., FREDE H.-G. (2005): Assessment of the effects of land use patterns on hydrologic landscape functions: development of sustainable land use concepts for low mountain range areas. *Hydrological Processes* 19: 659–672.
- FRENZEL H. (2007): Unterschiede in der Ausprägung physikalischer und chemischer Bodenparameter auf vergleichbarem Ausgangssubstrat in Abhängigkeit von der Landnutzung, Diplomarbeit, Institut Bodenkunde und Standortslehre, TU Dresden, Tharandt.
- HEGG, C. (2006): *Waldwirkung auf Hochwasser*, LWF Wissen Ber. Bayer. Landesanst. Wald Forstwirtsch. 55: 29-33.
- KEESSTRA S.D. (2006): The effects of natural reforestation on the hydrology, river morphology and sediment budget of the Dragonja River SW Slovenia, PhD thesis, Vrije Universiteit Amsterdam, 187 S.
- LAURANCE W. F. (2007): Environmental science: Forests and floods, *Nature* 449: 409-410.

- LANGE B., GERMANN P. F., LÜSCHER P. (2011): Runoff-generating processes in hydromorphic soils on a plot scale: free gravity-driven versus pressure-controlled flow, *Hydrological Processes* 25: 873–885.
- LEHMANN P. (2008): Bestimmung des Einflusses unterschiedlich alter Aufforstungen auf die Infiltrationseigenschaften eines Löß-Bodens im sächsischen Hügelland mittels Feldmessverfahren, Diplomarbeit, Institut Bodenkunde und Standortslehre, TU Dresden, Tharandt.
- LORZ C., VOLK M., SCHMIDT G. (2007): Considering spatial distribution and functionality of forests in a modeling framework for river basin management, *Forest Ecology and Management* 248: 17-25.
- MÜNCH, A. (2004): AKWA-M<sup>®</sup> – Teilflächen basiertes Wasserhaushalts- und Hochwassermodell, Dr. Dittrich & Partner Hydro-Consult GmbH Bannewitz.
- NAEF F., SCHERRER S., THOMA C., WEILER W., FACKEL P. (2000): Die Beurteilung von Einzugsgebieten und ihrer Teilflächen nach der Abflussbereitschaft unter Berücksichtigung der landwirtschaftlichen Nutzung – aufgezeigt an drei Einzugsgebieten in Rheinland-Pfalz. Im Auftrag des Landesamt für Wasserwirtschaft Rheinland-Pfalz. Bericht Nr. B003. 186 S.
- NIEHOFF D., FRITSCH U., BRONSTERT A. (2002): Land-use impacts on storm-runoff generation: scenarios of land-use change and simulation of hydrological response in a meso-scale catchment in SW-Germany, *Journal of Hydrology* 267: 80-93.
- NISBET T.R. U. THOMAS H. (2006): The role of woodland in flood control: a landscape perspective, in: B. Davies und S. Thompson (Hrsg.) "Water and the landscape: the landscape ecology of freshwater ecosystems". Proceedings of the 14th Annual IALE(UK) Conference. Oxford: IALE(UK): 118–125.
- NISBET T., SILGRAM M., SHAH N., MORROW K., BROADMEADOW, S. (2011) Woodland for Water: Woodland measures for meeting Water Framework Directive objectives. Forest Research Monograph 4, Forest Research, Surrey, 156 S.
- O'CONNELL P.E., BEVEN K.J., CARNEY J.N., CLEMENTS R.O., EWEN J., FOWLER H., HARRIS G.L., HOLLIS J., MORRIS J., O'DONNELL G.M., PACKMAN J.C., PARKIN A., QUINN P.F., ROSE S.C., SHEPHERD M., TELLIER S. (2004): Review of impacts of rural land use and management on flood generation, Impact study report, Technical report for DEFRA Flood & Coastal Defence R & D project FD2114, DEFRA, London.
- PILAŠ I., FEGER K.H., VILHAR U., WAHREN A. (2010): Multidimensionality of Scales and Approaches for Forest–Water Interactions, in: Bredemeier M., Cohen S., Godbold D.L., Lode E., Pichler V., Schleppi P. (Eds.): *Forest Management and the Water Cycle - An Ecosystem-Based Approach*, Ecological Studies 212, Springer: 351-380.
- RÖMER G. (2007): Potenzial von Landnutzungsänderungen für den natürlichen Hochwasserrückhalt in der Fläche im Einzugsgebiet der Schwarzen Pockau – Analyse, Bewertung und Optionen, Masterarbeit, Institut für Bodenkunde und Standortslehre, TU Dresden, Tharandt.
- SächsWG (2004): Sächsisches Wassergesetz vom 18. Oktober 2004, SächsGVBl. 2004, 482 S.
- SAMUELS P., KLIJN F., KORTENHAUS A., SAYERS P. (2009a): FLOODsite Final Report – Volume 1: Advancement in Knowledge and Understanding. HR Wallingford, UK, Project Contact No: GOCECT-2004-505420.

- SAMUELS P., RAMSBOTTOM D., SCHANZE J. (2009b): FLOODsite Final Report – Volume 2: Overview of the FLOODsite Pilots. HR Wallingford, UK, Project Contact No: GOCE-CT-2004-505420.
- SCHMIDT P.A., WILHELM E.G., EISENHAEUER D.R. (Hrsg.) (2008): Waldbehandlung, Waldmehrung und Auengestaltung unter Berücksichtigung von Hochwasservorsorge und Naturschutz im Osterzgebirge. Abschlussbericht zum DBU-Projekt: Hochwasserschutz- und naturschutzgerechte Behandlung umweltgeschädigter Wälder und Offenlandbereiche der Durchbruchstäler des Osterzgebirges, Landesverein Sächsischer Heimatschutz e.V., 178 S., [http://www.dbu.de/OPAC/ab/DBU-Abschlussbericht-AZ-18811\\_02.pdf](http://www.dbu.de/OPAC/ab/DBU-Abschlussbericht-AZ-18811_02.pdf), (abgerufen 27.12.2012).
- SCHWÄRZEL K. (2011): Böden, Landnutzung und Klima in ihrer Wirkung auf den Wasserhaushalt, Habilitationsschrift, TU Dresden, Institut für Bodenkunde und Standortslehre.
- SCHWÄRZEL K., CARRICK S., WAHREN A., FEGER K-H, BODNER G., BUCHAN G. (2011): Soil Hydraulic Properties of Recently Tilled Soil under Cropping Rotation Compared with Two-Year Pasture, *Vadose Zone J.*: 10: 354–366.
- SCHÜLER G., GELLWEILER I., SEELING S. (Hrsg.) (2007): Dezentraler Wasserrückhalt in der Landschaft durch vorbeugende Maßnahmen der Waldwirtschaft, der Landwirtschaft und im Siedlungswesen. Das INTERREG III B NWE Projekt WaReLa – Ergebnisse aus drei Jahren Umsetzung und Forschung für einen nachhaltigen Hochwasserschutz in der Fläche. Mitteilungen aus der Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz Nr. 64/07, 354 S.
- SEELING S., GELLWEILER I., HILL J., SCHÜLER G. (Hrsg.) (2009): Wege zum dezentralen Hochwasserschutz, *Trierer Geographische Studien* 31, Trier, 296 S.
- SMUL – SÄCHSISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR UMWELT UND LANDWIRTSCHAFT (2003): Mit dem Wald gegen die Flut, Staatsbetrieb Sachsenforst (ehem. Landesforst Sachsen), Broschüre, 44 S., [http://www.smul.sachsen.de/sbs/download/Mit\\_dem\\_Wald\\_gegen\\_die\\_Flut.pdf](http://www.smul.sachsen.de/sbs/download/Mit_dem_Wald_gegen_die_Flut.pdf) (abgerufen 27.12.2012).
- SMUL – SÄCHSISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR UMWELT UND LANDWIRTSCHAFT (2007): Vorbeugender Hochwasserschutz durch Wasserrückhalt in der Fläche unter besonderer Berücksichtigung naturschutzfachlicher Aspekte am Beispiel des Flusseinzugsgebietes der Mulde in Sachsen, Schriftenreihe der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft, Heft 35/2007, 306 S.
- SONNEMANN, S., MÜNCH A., DITTRICH I., EISENHAEUER D.-R. (2008): Einfluss des Waldanteils, der Baumartenzusammensetzung und Bestandesstruktur sowie der Waldbewirtschaftung auf das Abflussregime von Flusseinzugsgebieten im Osterzgebirge, in: Schmidt P. A., Wilhelm E.G., Eisenhauer D.R. (Hrsg., 2008): Waldbehandlung, Waldmehrung und Auengestaltung unter Berücksichtigung von Hochwasservorsorge und Naturschutz im Osterzgebirge. Abschlussbericht zum DBU-Projekt: Hochwasserschutz- und naturschutzgerechte Behandlung umweltgeschädigter Wälder und Offenlandbereiche der Durchbruchstäler des Osterzgebirges, Dresden, Landesverein Sächsischer Heimatschutz: 147-159.
- WAHREN A., SCHWÄRZEL K., FEGER K.H., MÜNCH A., DITTRICH I. (2007): Identification and model based assessment of the potential water retention caused by land-use changes, *Advances in Geosciences* 11: 49–56.
- WAHREN A., FEGER K.H., SCHWÄRZEL K., RÖMER G., MÜNCH A., DITTRICH I. (2008): Landnutzungsabhängiger Gebietsrückhalt bei Hochwasser auf der Grundlage sozioökonomisch begründeter Zukunftsszenarien. - In: U. Haberlandt, B. Riemeier, M. Billib, H.R. Verworn, H. Kleeberg (Hrsg.): Hochwasser, Wassermangel, Gewässerverschmutzung –



Problemlösung mit modernen hydrologischen Methoden, Beiträge zum Tag der Hydrologie 2008, 27./28. März 2008 an der Leibniz Universität Hannover, Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung Heft 23.08: 73 - 81, ISBN: 978-3-940173-96-6, Fachgemeinschaft für Hydrologische Wissenschaften in der DWA, Hennef.

- WAHREN A., SCHWÄRZEL K., FEGER K.H., MÜNCH A. (2009): Land-use effects on flood generation – considering soil hydraulic measurements in modelling, *Advances in Geosciences* 21: 99–107.
- WAHREN A., FEGER K.H. (2010): Model-Based Assessment of Forest Land Management on Water Dynamics at Various Hydrological Scales – A Case Study, in: Bredemeier, M.; Cohen, S.; Godbold, D.L.; Lode, E.; Pichler, V.; Schleppi, P. (Eds.): *Forest Management and the Water Cycle - An Ecosystem-Based Approach*, *Ecological Studies* 212, Springer: 453-469.
- WAHREN A., FRANK S., WALTHER P., SCHMIDT W., FEGER K.H. (2011): Erstellung eines Leitfadens für Ausgleichsmaßnahmen auf landwirtschaftlich genutzten Flächen in den Hochwasserentstehungsgebieten Sachsens, *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 55: 155-165.
- WAHREN A., SCHWÄRZEL K., FEGER K.H. (2012): Potentials and limitations of natural flood retention by forested land in headwater catchments: evidence from experimental and model studies. - *J. Flood Risk Management* 5: 321–335.
- WENDEL D., WILHELM E.G., ROCH T., WAHREN A. (2008): Das Projektgebiet als Hochwasserentstehungs- und Hochwasserschadgebiet, in: Schmidt P. A., Wilhelm E.G., Eisenhauer D.R. (Hrsg.): *Waldbehandlung, Waldmehrung und Auengestaltung unter Berücksichtigung von Hochwasservorsorge und Naturschutz im Osterzgebirge. Abschlussbericht zum DBU-Projekt: Hochwasserschutz- und naturschutzgerechte Behandlung umweltgeschädigter Wälder und Offenlandbereiche der Durchbruchstäler des Osterzgebirges*, Dresden, Landesverein Sächsischer Heimatschutz: 32-37.

## **Anhänge**

## **Anhang 1:**

**WAHREN A., SCHWÄRZEL K., FEGER K.H., MÜNCH A., DITTRICH I. (2007): Identification and model based assessment of the potential water retention caused by land-use changes, Advances in Geosciences 11: 49–56.**

# Identification and model based assessment of the potential water retention caused by land-use changes

A. Wahren<sup>1</sup>, K. Schwärzel<sup>1</sup>, K. H. Feger<sup>1</sup>, A. Münch<sup>2</sup>, and I. Dittrich<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Soil Science and Site Ecology, Dresden University of Technology, Tharandt, Germany

<sup>2</sup>Dr. Dittrich & Partner Hydro-Consult GmbH, Bannewitz, Germany

Received: 15 January 2007 – Revised: 13 April 2007 – Accepted: 15 May 2007 – Published: 1 June 2007

**Abstract.** The extreme summer flood in the Elbe River watershed initiated a debate on the role of forest conversion and afforestation as measures for preventive flood protection. To quantify the effect of forest conversion and afforestation on flood runoff from catchments reliable model calculations are essential. The article overviews the present state of our work and provides an example for a model-based assessment of potential water retention caused by land-use changes in a catchment in the Central Ore Mountains (Saxony, Germany). The potential of flood control by land-use management measures is highly dependant on the site-specific soil and relief conditions and the rainfall event characteristics. The pre-event soil moisture is distinctly lower under forest land-use. Furthermore, infiltration, percolation in the sub-soil is increased. These effects exist for small/medium-scale events whereas they become marginal for extreme events.

## 1 Introduction

The revitalization and increase of natural water retention potentials – notably in headwater catchments – is a major component of sustainable flood prevention strategies. It is logical that changes in land-use (e.g. settlements including road-construction, deforestation, distinct practices in arable and grassland management) contribute to an increased frequency and severity of flood generation. For forest land-use, it has been stated that afforestation and a promotion of close-to-nature silviculture will considerably increase the water retention in landscapes. However, there is a controversial debate on the general applicability of such non-structural flood risk management measures with respect to event size and scale-based physical conditions. To quantify the impact of land-use changes on the behavior of flood generation

in river basins well-founded model calculations are needed. Furthermore, such information is needed for land-use planning and creation of a legal framework (e.g. novel §100 Water Management Law in Saxony (=SächsWG) and/or implementation of specific aspects of the EU-Water-Framework-Directive). This research is undertaken within the framework of the running projects “Analysis, Assessment, and Implementation of Measures for Preventive Flood Protection in the Jeseniky Mountains/Czech Republic” (financed by the DBU) and “FLOODsite – Integrated Flood Risk Analysis and Management Methodologies” (Integrated Project 6th EU-FP).

## 2 Challenge

As a result of the disastrous floods during recent years, especially the Elbe flood in August of 2002, the novel water law of Saxony (SächsWG) contains regulations concerning flood originating areas (“Hochwasserentstehungsgebiete”). Such areas have to be defined by the flood protection authority (Sächsische Landeshochwasserzentrale).

For the flood originating areas the novel law addresses the conservation and improvement of the natural water retention. The soils should be unsealed or afforested if it is possible. In case of an unavoidable loss or reduction of the natural water retention in these areas a suitable compensation is required (e.g. afforestation).

In order to assess the effectiveness of potential land-use changes at a given location the following two questions are essential (Naef et al., 2000):

- Do the physical settings (notably soils and relief) allow an improved water retention if land-use is changed?  
→ runoff generation
- To what extent does runoff from this location contribute to the flood hydrograph of the total catchment?  
→ runoff concentration

Correspondence to: A. Wahren  
(wahren@frsws10.forst.tu-dresden.de)

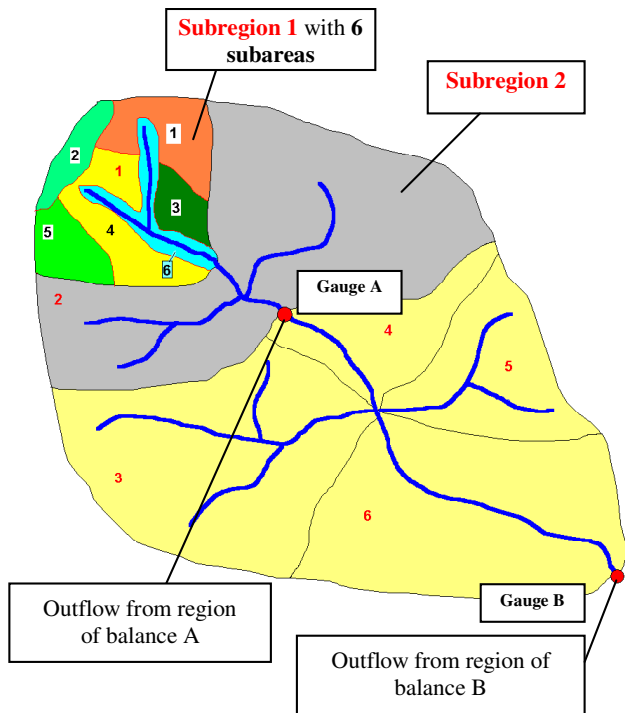


Fig. 1. Structure of a model-catchment AKWA-M®.

Therefore, suitable methods and strategies are required. There are different types of models which we use for the identification of the land-use impact on the flood behavior of catchments.

To assess all spatial site information from maps or field investigations for the estimation of the general runoff behavior expert-systems like WBS-FLAB (Merta et al., 2005) or the PBS (“Scherrer-key”: Naef et al., 2000) were developed. These models provide (without any complex rainfall-runoff calculations) a rough overview about catchments with respect to their *runoff generation* behavior. Based on this information areas in which fast runoff components are dominant can be identified.

However, if individual rainfall events have to be assessed with respect to flood dynamics, e.g. to estimate the impact of the pre-event soil moisture, plot model calculations are indispensable. For this purpose, we use the plot model BROOK90 (Federer, 2003). To scale-up the results from the plot model and to consider the *runoff concentration* components spatial distributed rainfall-runoff models are applied. In our study we apply different models, e.g. AKWA-M® (Münch, 2004).

The main goal of the ongoing project is to assess land-use options especially afforestation with respect to water retention during flood events. In the following we present an example.

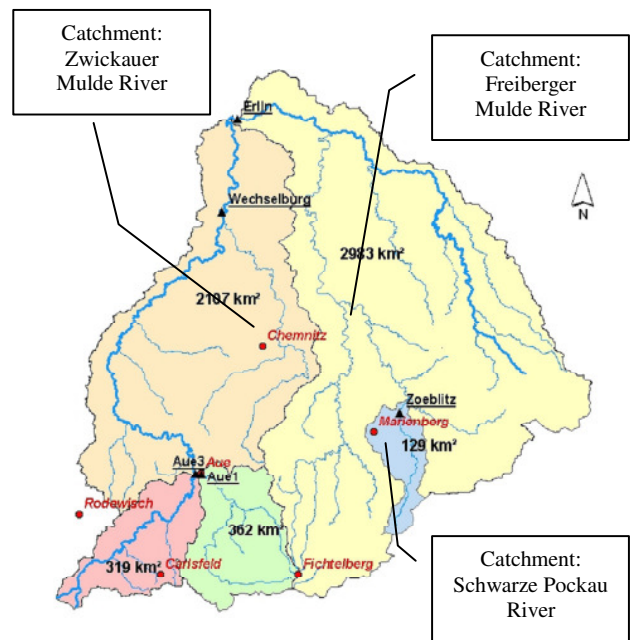


Fig. 2. Catchment of the Schwarze Pockau River with gauging station Zöblitz (Mulde Catchment, Ore Mountains – Elbe Catchment).

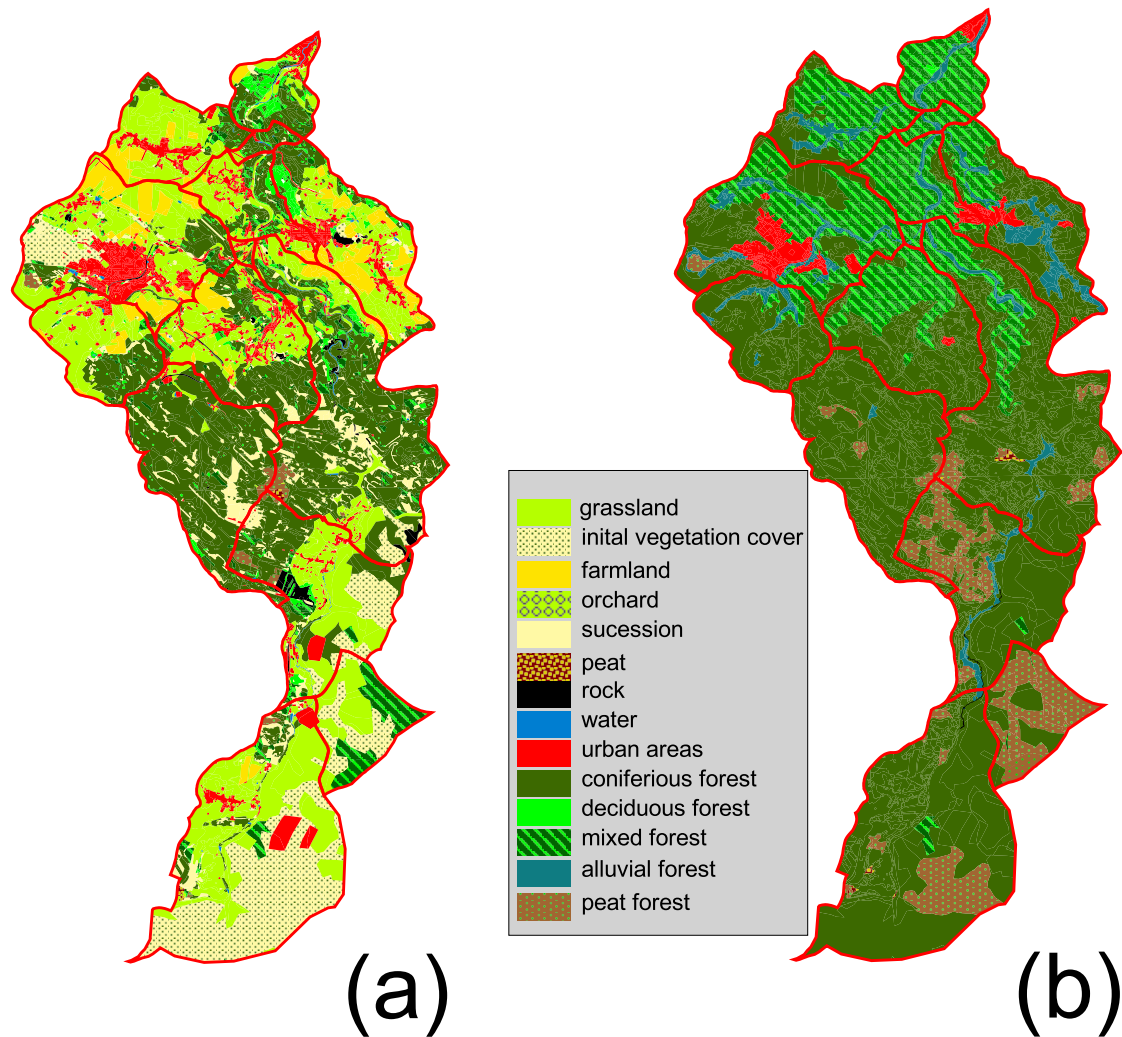
### 3 Calculation example (Schwarze Pockau River)

#### 3.0.1 AKWA-M®

The rainfall-runoff model AKWA-M® is based on the water budget model AKWA-M (Golf, Luckner 1991; Münch 1994). The model was advanced by Dr. Dittrich & Partner Hydro-Consult GmbH (Dittrich et al., 2004). This water balance and rainfall-runoff model simulates the water balance and flood runoff in watersheds and transforms the different processes from the site-scale to a larger area. It contains physically based components as well as a conceptual background.

The application of AKWA-M® covers manifold tasks in practice, research, and education. With the help of the model the following processes can be simulated and quantified:

- the available water for changing land-use and climate change;
- water balances for management and controlling (dams, water stores, groundwater recovery);
- effects on the water balance resulting from river revitalization, hydromelioration, groundwater use, urbanization, or land-use changes;
- anthropogenic influences to protected natural area or landscape;
- water balance of specified areas (mires, waste disposals);

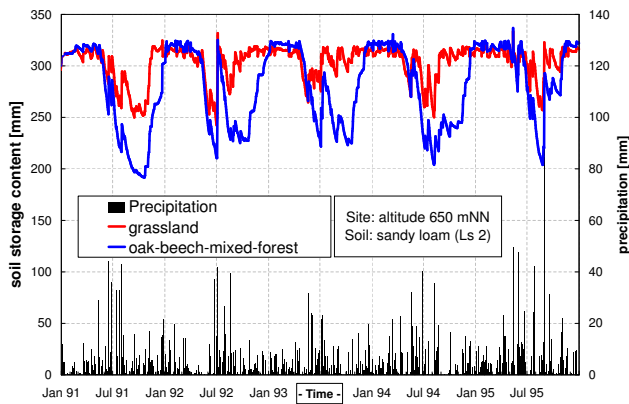


**Fig. 3.** Land-use parameterizations (a) present land-use and (b) PNV.

- changes of groundwater recharge in urban areas with artificial infiltration of precipitation;
- prognostic determination of the system status for flood models;
- flood runoffs from historical precipitation and statistical design storms for different dimensioning tasks;
- calculation of storage or dimensioning for dams, flood detention reservoirs.

The structure of the model-catchment results from subareas (unit areas or hydrotops), combined to partial and balance regions (Fig. 1). In the pre-processing the subareas are provided by uniting the relevant geodata with GIS applications (e.g. ARCVIEW). For simulation of vertical and horizontal processes different calculation modules are available in the program.

- Subareas:  
characterized by geodata as land-use, elevation, slope, orientation, soil type, type of groundwater and others.  
simulated processes: adoption of climate data, interception, transpiration, evaporation, infiltration, soil water balance, surface and hypodermic runoff, depth infiltration.
- Subregions:  
characterized by lithofacies, stream network, and the sum of all subareas.  
simulated processes: classification of climate data, runoff concentration, wave propagation.
- Regions of balance:  
characterized by the superposition of the sub-region results.



**Fig. 4.** Water content [mm] in the soil storage for different land-use (timestep 1 d).

AKWA-M<sup>®</sup> offers the advantage that it allows to calculate the pre-event situation with the water budget model (time step 1d) and then to increase the time discretization for the flood event using actual conditions (storage, water contents etc.) as initial state.

All model calculations are limited by the availability of the required data. The following data are needed for the AKWA-M<sup>®</sup> calculation.

- Water balance:

Daily or monthly mean climate data (precipitation, air temperature, air humidity, sunshine duration or global radiation, wind speed) Observed data optional (flow rate, soil moisture, groundwater level).

- Flood:

Precipitation high resolved (1 h to 5 min); to calculate  $HQ(T)$  statistical sum of precipitation  $P(T)$  Optional observed data (flow rate).

- Geodata:

Land-use, geo- and morphological stream data, soil, geology (preparation with geographic information systems (GIS) preferred).

- Subareas:

characterized by geodata as land-use, elevation, slope, orientation, soil type, type of groundwater and others. simulated processes: adoption of climate data, interception, transpiration, evaporation, infiltration, soil water balance, surface and hypodermic runoff, depth infiltration.

- Subregions:

characterized by lithofacies, stream network, and the sum of all subareas. simulated processes: classification of climate data, runoff concentration, wave propagation.

- Regions of balance:

characterized by the superposition of the sub-region results.

All these data were available for the catchment of the Schwarze Pockau. The AKWA-M<sup>®</sup> model was calibrated for this catchment for the “FLOODsite” project (pilot study “Elbe river” – <http://www.floodsite.net/>).

The geodata from the Czech part (~20% of the total catchment area) are not in the same spatial resolution as the data for the part located in Germany. We decided to use the more detailed soil and land-use maps (BKKonz 1:25 000 and CIR 1:10 000) for the German part and the less detailed maps (BÜK 200 1:200 000 and Corine 1:100 000) for the Czech part. It is logical that this approach produces inhomogeneities but the advantages of the high detailed information for the catchment area in Germany preponderate.

### 3.0.2 Changed land-use

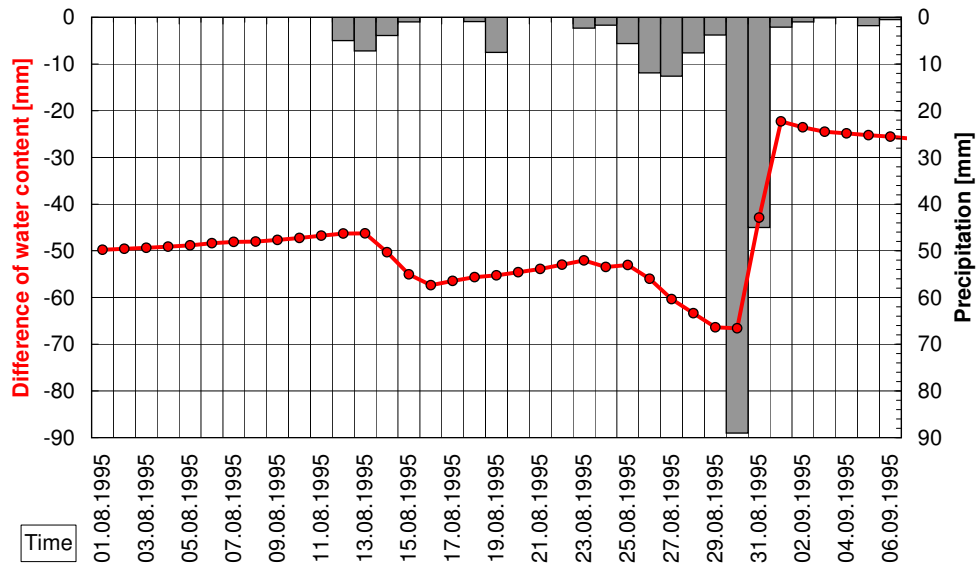
Two different land-use parameterizations have been calculated to show the impact of land-use on the hydrological response of local subareas and the total catchment, respectively. Especially the soil water budget is considered in this investigation (change of storage, conductivity, preferential flow etc.). The catchment of the river Schwarze Pockau as a subcatchment of the Mulde river basin was chosen to compute land-use effects (Fig. 2). This catchment located in the Ore Mountains is a flood originating area (according to SächsWG) and belongs to catchment of the Elbe river, where the most serious flood damages ever in Europe occurred in August 2002.

The two land-use parameterizations are (Fig. 3):

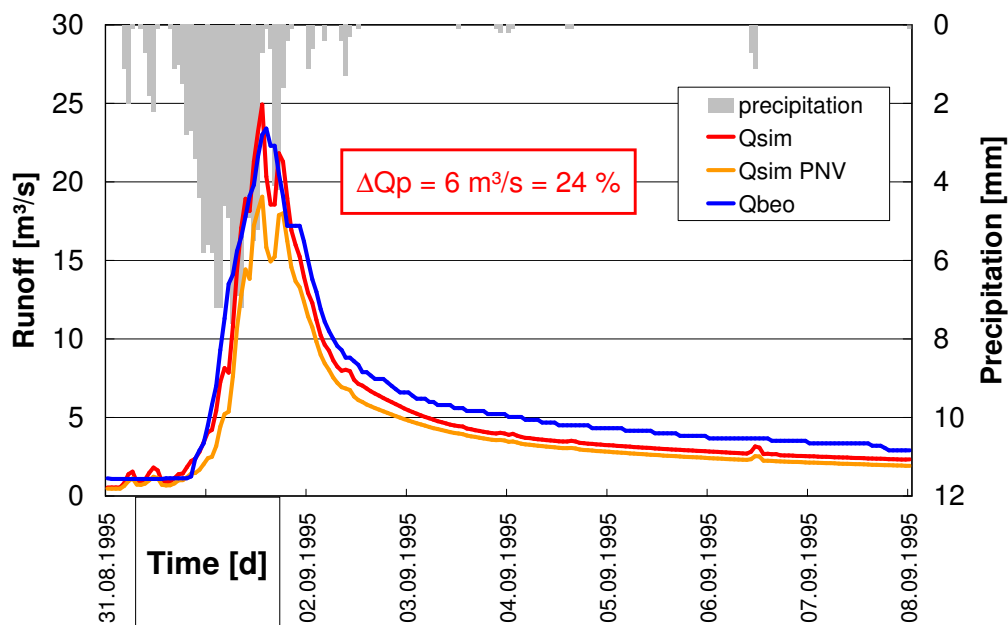
- present land-use given by CIR-data (LfUG 2006): 41% forest; 47% grassland; 7% farmland (arable land) – calibration
- potential natural vegetation (PNV) except urban areas given by PNV-data (Schmidt et al., 2003): 97% forest predominant oak-beech mixed forest and spruce forest.

The choice of these two parameterizations should represent afforestation to identify the maximum water retention effect caused by forests according to SächsWG. Forest instead of grassland or farmland is simulated by the following parameter changes:

- an increase of root depth, that means a larger part of the soil storage can be emptied via transpiration;
- an additional organic layer on top of the mineral soil;
- a higher amount of organic matter in the top layers of the mineral soil;
- more macro-pores represented by a higher macro-pore conductivity.



**Fig. 5.** Difference of water content [mm] in the soil storage between grassland and oak-beech-mixed forest – red – with precipitation [mm] – gray – (timestep 1 d).



**Fig. 6.** Runoff ( $Q$ ) hydrographs [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] gauging station Zöblitz.

$Q_{\text{obs}}$  – observed runoff,  $Q_{\text{sim}}$ , (a) – simulated (CIR(a)),  $Q_{\text{sim}}$  (b) – simulated (PNV(b)), (timestep 1 h).

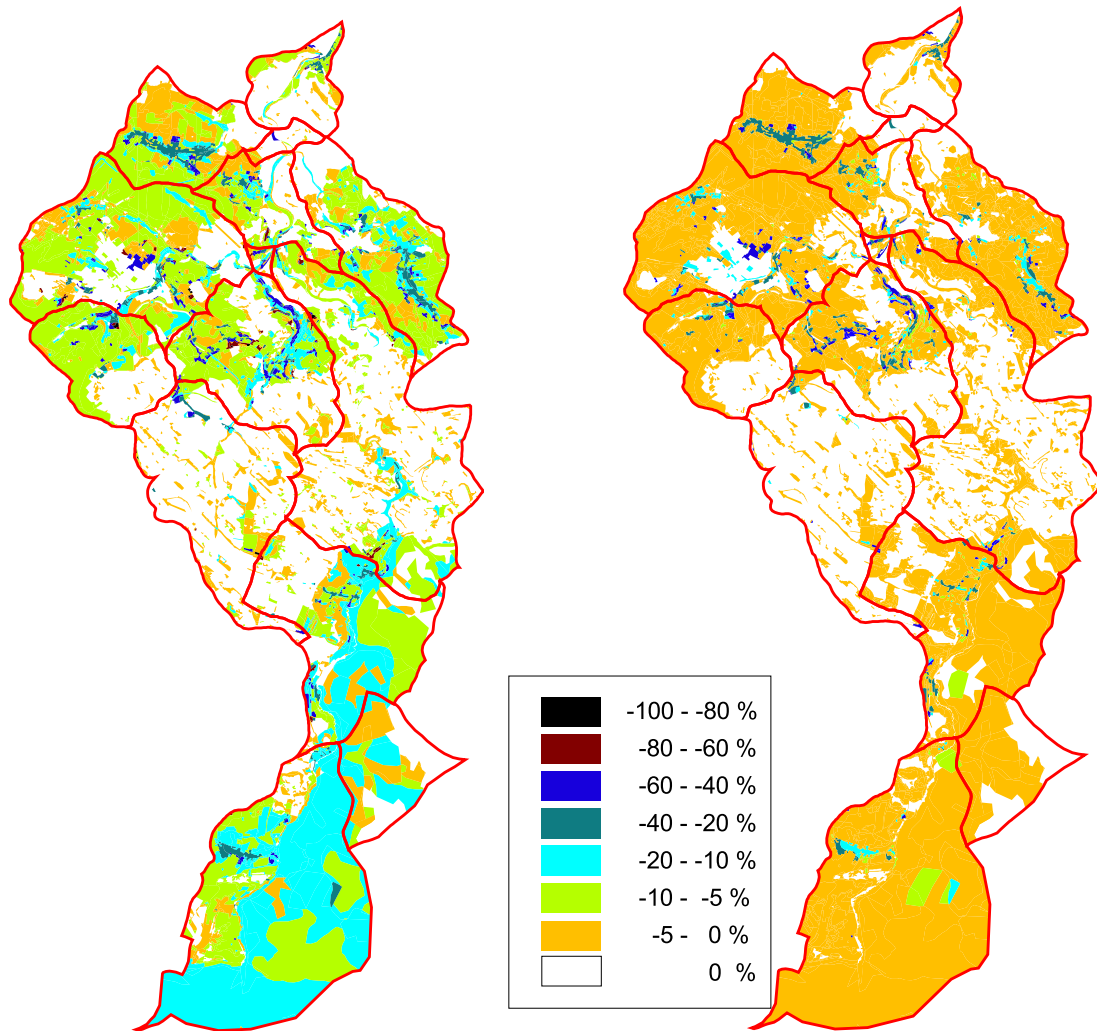
### 3.1 Results

To demonstrate the general impact of an afforested grassland plot Fig. 4 shows the different soil storage content for a selected soil type calculated with BROOK90. The soil water storage is averaged over all soil layers. It is obvious that during the summer months the water consumption of the forest vegetation is higher resulting in lower water contents in the

soil storage. In July 1992 and 1993 and in August/September 1995 there are rain events which produce a fast increase of water storage. Figure 5 focuses on heaviest of these events on 1 September ( $89 \text{ mm d}^{-1}$ ) and shows the difference between the two curves in Fig. 4 during the days before and during that event.

Figure 5 points out that there were  $\sim 65 \text{ mm}$  less soil moisture (minimum of the difference curve) calculated under the





**Fig. 7.** Difference of flood effective rainfall [%] parameterization (b) – (a) for two rainfall events. Left – 59 mm d<sup>-1</sup> Right – 229 mm 2 d<sup>-1</sup>.

beech-oak-mixed forest than under the grassland. But the infiltration limited the water transport into the soil. Thus, only ~40 mm more (increase of the difference curve from –65 mm up to –25 mm) could be retained due to the changed land-use.

The example underlines that not only the additional storage is important for the extra water retention but that also the availability of this storage is highly related to the rainfall intensity.

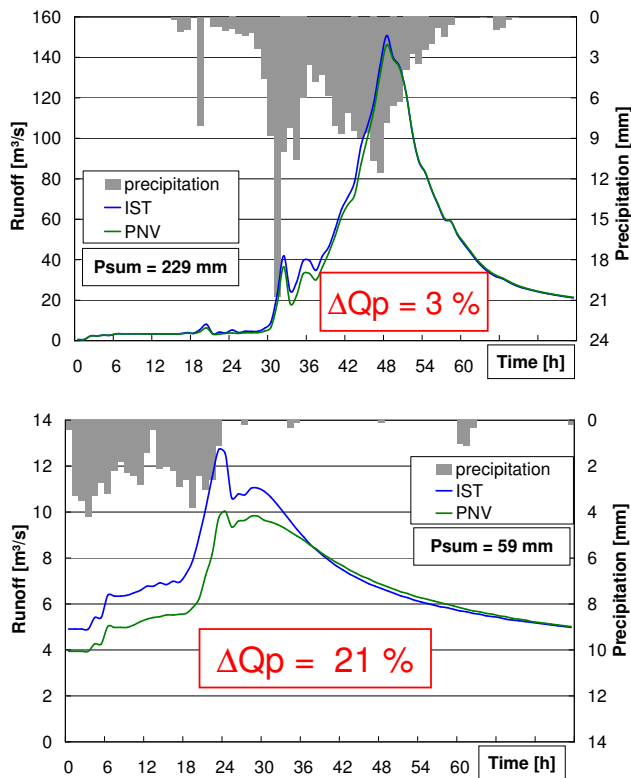
Figure 6 provides the runoff hydrograph for the total catchment (gauging station Zöblitz) for the same event calculated for the two parameterizations (CIR and PNV) with AKWA-M<sup>®</sup>. The maximum decrease of the peak flow for that event caused by afforestation is 24%.

Two other events were calculated in order to estimate the effects of land use-changes in their spatial distribution. A more frequent event (~60 mm d<sup>-1</sup>) and the highly infrequent event from August 2002 (~230 mm within 2 d). Figure 7

shows for these two events the change in flood effective rainfall. The flood effective rainfall is the component of the storm hyetograph which is neither retained on the land surface nor which infiltrates into the soil – it is that part of the rainfall which is transformed into fast runoff components. It is obvious that there is nearly no change for the very seldom flood event because the storage capacity is limited. The role of land-use during such heavy rain events is negligible. For the more frequent event the afforested areas show a decrease in flood effective rainfall from 5% up to 20%. Thus, it is evident that the impact of the land-use on flood formation decreases with the increase of rainfall intensity.

Figure 8 shows the corresponding runoff hydrographs for both events.

The peak discharge for the highly infrequent event from August 2002 is nearly unchanged. For the more frequent event the decrease of the peak flow is ~20%.



**Fig. 8.** Changed peak flow ( $Q_s$ ) and runoff hydrograph due to changed land-use (blue – CIR (a), green – PNV (b)) for different rainfall situations (timestep 1 h).

#### 4 Conclusions

Spatial distributed hydrological models – in our study AKWA-M<sup>®</sup> – are efficient tools to predict effects on water budget and floods due to changes in land-use or climate. Especially the pre-event soil moisture conditions can be taken into account with the here presented approach. Such models provide water budgets and storm runoff components for both single hydrotops and for the catchment in total.

The produced simulation indicates that a projected canopy change might cause a runoff reduction which can be explained as follows:

- A higher interception leads to a decreased throughfall (net precipitation). This causes a lower soil moisture and thereby a greater storage.
- The larger root penetration and higher fine root densities in the subsoil in forested sites cause a larger depletion of the soil moisture during the growing season. Therefore, with a larger storage capability is created. Thus, also intense rainfall events can be buffered more effectively. This increased storage capacity may also be available till the winter months, depending on the atmospheric conditions.

- Deeper soils are able to store higher amounts of water (increased available field capacity).
- The high infiltration capacity of forest soils is another important factor in forested areas. Therefore, less surface runoff is generated in comparison with grassland or agricultural crop land. Not only erosion might be reduced or avoided also the rainfall is disposed through macropores in parts of the soil profile where it can be stored or transferred to the aquifer.
- With increased infiltration runoff formation shifts from the soil surface to deeper parts of the soil (interface to C-horizon, bedrock aquifer). Of course, if soil moisture is high, more hypodermic runoff might be generated.
- The potential of flood control by land-use management measures is highly dependant on the site-specific soil and relief conditions and the rainfall event characteristics.
- Reliable model calculations are essential for successful implementation of measures. However, there is a considerable lack of data for model parameterization with respect to short-term vegetation changes and long-term effects on soil properties.

#### 5 Outlook

The article briefly overviews the current state of our ongoing project work. It is quite clear that there are many uncertainties in the models and their parameterization. A viable approach to point out the weaknesses of single model approaches is the use of different models and the combination of the results. Our focus is not the best fit of a runoff hydrograph on a measured discharge. We try to model the process as plausible as possible on the plot and transfer this knowledge to the next scale of smaller landscapes.

Accordingly, the future challenges are:

- to develop model tools to describe changes in soil properties as a result of a changed land-use;
- to implement new or existing approaches for hydrophobicity, surface roughness, and upsilting;
- to assess the impact of measures considering the improvement of natural water retention to areas downstream.

The main goal is to develop a rule type to find an optimized land-use in flood originating areas by qualifying and quantifying the potential effects of such land-use changes on water retention and related pattern of runoff formation, notably with respect to mid- and long-term changes in the soils.

Edited by: K.-E. Lindenschmidt

Reviewed by: K. Schneider and an anonymous referee

## References

- Dittrich, I., Münch, A., Wahren, A., und Goldacker, S.: Hochwasserminderung und Wasserhaushaltsänderung durch Aufforstung und Waldumbau in den Einzugsgebieten des Osterzgebirges; Sächsische Landestalsperrenverwaltung, Pirna, Dr. Dittrich & Partner Hydro-Consult GmbH Bannewitz, 2004.
- Dittrich, I., Münch, A., Kessler, K., und Goldacker, S.: Walddynamik und ihre Wirkung auf Hochwasser und Wasserhaushalt, Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft, Dresden, Dr. Dittrich & Partner Hydro-Consult GmbH Bannewitz, 2006.
- Federer, C. A.: BROOK90 – A Simulation Model for Evaporation, Soil Water, and Streamflow, Handbook and Model, 2003.
- Golf, W. und Luckner K.: AKWA – ein Modell zur Berechnung aktueller Wasserhaushaltsbilanzen kleiner Einzugsgebiete im Erzgebirge, *Acta Hydrophysica*, 32, 5–20, 1991.
- Golf, W., Luckner, K., und Münch, A.: Berechnung der Waldverdunstung im Wasserhaushaltsmodell AKWA, *Meteorologische Zeitschrift*, 2, 99–107, 1993.
- Merta, M., Seidler, C., und Hammer, H.: Hochwasser und Naturschutz im Weißeritzkreis – Ein Expertensystem als Entscheidungshilfe für das Flächenmanagement in Einzugsgebieten, Vortrag Workshop EMTAL, Einzugsgebietsmanagement von Talsperren in Mittelgebirgen, 2005.
- Münch, A.: Wasserhaushaltsberechnungen für Mittelgebirgseinzugsgebiete unter Berücksichtigung einer sich ändernden Landnutzung, PhD dissertation, TU Dresden, Fak. f. Forst-, Geo- u. Hydrowissenschaften, 1994.
- Münch, A.: AKWA-M – Teilflächen basiertes Wasserhaushalts- und Hochwassermodell, Dr. Dittrich & Partner Hydro-Consult GmbH Bannewitz, 2004.
- Naef, F., Scherrer, S., Thoma, C., Weiler, W., und Fackel, P.: Die Beurteilung von Einzugsgebieten und ihrer Teilflächen nach der Abflussbereitschaft unter Berücksichtigung der landwirtschaftlichen Nutzung – aufgezeigt an drei Einzugsgebieten in Rheinland-Pfalz, Im Auftrag des Landesamt für Wasserwirtschaft Rheinland-Pfalz, Bericht Nr. B003, 186 S., 2000.
- Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie – LfUG: ColorIn-fraRot (CIR)-Biotoptypen- und Landnutzungskartierung, LfUG Abteilung 4 (Natur, Landschaft, Boden), Zeitbezug 1992/1993, 2006.
- Sächsisches Wassergesetz (SächsWG): dated 18 October 2004, SächsGVBl.
- Schmidt, P. A., Hempel, W., Denner, M., Döring, N., Gnüchtel, A., Walter, B., und Wendel, D.: Potentielle Natürliche Vegetation Sachsens mit Karte 1:200.000, Materialien zu Naturschutz und Landschaftspflege, Hrsg. Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, 2003.
- Wahren, A., Schwärzel, K., Feger, K. H., Dittrich, I., und Münch, A.: Möglichkeiten und Grenzen forstwirtschaftlicher Maßnahmen im Rahmen des vorbeugenden Hochwasserschutzes, Tagungsband NNA Seminar 50/05: Hochwasserschutz unter neuen Vorzeichen – Das neue Hochwasserschutzgesetz, Alfred Toepfer Akademie für Naturschutz, Schneverdingen, 2005.
- Wahren, A., Schwärzel, K., Feger, K. H., Dittrich, I., und Münch, A.: Analyse, Bewertung und Umsetzung von Maßnahmen des präventiven Hochwasserschutzes in der Mittelgebirgsregion Jeseníky (Altvater-Gebirge, Tschechische Republik), Umweltkooperationen in der erweiterten Europäischen Union, 11. Internationale Sommerakademie der DBU, Initiativen zum Umweltschutz Bd. 66, Erich Schmidt Verlag, Berlin, 224–234, 2006.

## **Anhang 2:**

**WAHREN A., SCHWÄRZEL K., FEGER K.H., MÜNCH A. (2009): Land-use effects on flood generation – considering soil hydraulic measurements in modelling, Advances in Geosciences 21: 99–107.**

# Land-use effects on flood generation – considering soil hydraulic measurements in modelling

A. Wahren<sup>1,2</sup>, K.-H. Feger<sup>1</sup>, K. Schwärzel<sup>1</sup>, and A. Münch<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Soil Science and Site Ecology, Dresden Water Center, TU Dresden, Faculty of Forest, Geo and Hydro Sciences, 01735 Tharandt, Germany

<sup>2</sup>Dr. Dittrich & Partner Hydro-Consult GmbH, 01728 Bannewitz, Germany

Received: 14 January 2009 – Revised: 20 March 2009 – Accepted: 28 April 2009 – Published: 12 August 2009

**Abstract.** The investigation in the catchment of the Mulde (51°0′55″ N, 13°15′54″ E Saxony, Germany) researches the effect of afforestation measures on the soil hydraulic properties. The concept of a “false chronosequence” was used to quantify the time-dependent dynamical character of the forest impact. Four adjacent plots were identified at a test location with comparable pedological start conditions and a set of tree stands of different age: (1) arable field (initial state); (2) 6-year-old afforestation; (3) 50-year-old afforestation; (4) ancient natural forest (“target” stocking). Water retention curves and unsaturated conductivities were analysed in the lab. In the field, the undisturbed infiltration capacities were measured quantitatively (hood infiltrometer) and qualitatively (brilliant blue tracer). Pronounced differences between all 4 plots were detected. The afforestation causes an increased infiltration and soil water retention potential. Especially the topsoil layers showed a distinct increase in conductivity and portion of coarse/middle pores. The influence of these changes on rainfall-runoff calculations at the test location was analysed in this study.

## 1 Introduction

The European Flood-Directive (EC 2007) points out the need of flood risk maps. Based on these maps flood risk management plans will be prepared focusing on prevention, protection, and preparedness. The assessment of the catchments’ potential to retain water in the landscape is part of the management plans. This effort has to be done river-basin-oriented and directly linked to the EU-Water-Framework-Directive (EC 2000). Thus, emphasis has to be put on the detection of synergy effects between the good ecolog-

ical status (e.g. minimize technical impacts) of the water bodies and flood protection. As a partner in the Integrated Project “FLOODsite” (6th EU-FP) we investigate the impact of land-use on runoff formation and runoff concentration. Additionally, the novel Water Law of Saxony (SächsWG 2004) contains regulations concerning “flood formation areas” (“Hochwasserentstehungsgebiete”). For such “flood formation areas” the novel law addresses the conservation and improvement of the natural water retention.

It is generally accepted that changes in land-use patterns (e.g. expansion of settlements including road-construction, deforestation, distinct practices in arable and grassland management) contribute to an increased frequency and severity of flood generation. For forest land-use, it has been stated that afforestation and the promotion of sustainable forest management will considerably increase the water retention in landscapes (FAO 2003). However, there is a controversial debate on the quantitative impact of such non-structural flood risk management measures with respect to event size and scale-based physical conditions (e.g. Calder et al., 2007; Laurance 2007). Modelling approaches very often neglect important aspects when rainfall-runoff-models are parameterised. Hence, many models just consider vegetation parameters (root depth, leaf area index (LAI), canopy height or parameters generalized in the curve number (CN) approach). Some more advanced models (e.g. AKWA-M: Münch 2004; WaSiM-ETH: Schulla and Jasper 2001) also include pre-event soil water storage by calculating land-use specific evapotranspiration and related soil water dynamics. In addition, one should also be aware that changes in the vegetation cover (e.g. conversion from arable land into grassland or forest) in the mid- to long-term will also result in distinct changes in soil hydraulic properties (infiltration, percolation, retention).



Correspondence to: A. Wahren  
(wahren@forst.tu-dresden.de)

## 2 Methods and material

### 2.1 False chronosequence

Afforestation appears to be a potential measure to increase the water retention in the landscape (FAO, 2003; Münch et al., 2007; Wahren et al., 2008). However, the influence of such long-term measures is not easy to observe at experimental sites. RR-models help to estimate the effect of measures but they describe only the processes as they are implemented in the applied model. In such RR-model based analyses, the change in land-use often is accomplished just by changing the above-mentioned vegetation parameters whereas most of the soil hydraulic properties remain unchanged. Furthermore, the typical practice is to parameterise the soil hydraulic characteristics by fitting the RR-model to a given runoff hydrograph. Due to that, the physical background of the soil parameters gets lost and a reliable prediction of the impact of a changed land-use is impossible.

The ongoing debate (e.g. Calder, 2006; Schüler, 2006; Wahren et al., 2007a) on decentral flood protection by adapted land-use still presents a lot of uncertainty associated with the model-based assessment of the efficiency of such measures.

To assess land-use effects on soil hydraulic properties we implemented experimental work on afforested sites. The concept of a “false chronosequence” was used to keep the effort reasonable. For our purpose it was necessary to find a location where afforested arable land next to an arable plot, which was still in use, could be investigated. It was quite important that the pedogenetic background settings (geology, elevation, slope, aspect etc.) of the plots were similar. In the best case, there might be several adjacent plots representing different ages of afforestation and an ancient close-to-nature forest stand.

A cropland plot represented the initial state, the plots with different old trees stood for succession stages after tree planting, whereas the ancient forest represented the “target” stocking. For each of these plots the soil hydraulic properties were identified.

### 2.2 Investigation site

An adequate investigation site was searched in the upper Mulde catchment (Saxony, Germany). This catchment is part of the transnational Elbe river basin.

A suitable site was found at the eastern border of the “Zellwald” forest in the Saxon loess hill zone (51°0′55″ N, 13°15′54″ E). In this protected area some spots of arable land had been afforested in the past. An excellent setting was detected with the following land-use sequence on adjacent plots:

- (1) arable field (initial state);
- (2) 6-year-old afforestation (young afforestation);

- (3) 50-year-old afforestation (old afforestation);
- (4) ancient natural forest (“target” stocking).

The pedological background (“start”) conditions were comparable. All plots were characterised by a loamy silt substrate derived from the initial loess parent material.

### 2.3 Measurements

The “forest effect”, in comparison to other land-uses on floods, can be split into two general parts: retention by additional provided storage (higher water consumption and higher interception) and decelerating runoff by shifting water into slower pathways (improved infiltration and vertical percolation, cf. Wahren et al., 2007b). The key values to assess the retention capacity are the air-filled pore-space (empty soil storage) before a rainstorm occurs and the infiltration capacity.

A combination of field and lab measurements was applied to examine the soil hydraulic behaviour under the different land-uses. The aim was to detect both the land-use driven change in the soil matrix for water retention and the on-site infiltration conditions, which are highly dependent on the soil structure (macropores etc.).

#### 2.3.1 Field measurements

##### *Infiltration capacities*

Hood infiltrometer (Schwärzel and Punzel, 2007) field tests in conjunction with time-domain reflectometry (TDR) measurements were carried out to characterize the effect of afforestation on saturated and near-saturated soil hydraulic conductivity. Hood infiltrometer enables the measurement of hydraulic properties from saturation up to the bubble point of the soil. Detailed information on the method and data analysis is given by Schwärzel and Punzel (2007). For every land-use plot we performed five replicate measurements.

##### *Tracer experiments*

To visualise changes in the infiltration pathways, dye tracer experiments were conducted for each of the four plots. “Brilliant Blue FCF” has been frequently used as a dye tracer to stain flow pathways in porous media (Flury and Flühler, 1995) and has a low toxicity (Flury and Flühler, 1994). This colour tracer was used to avoid any ecosystem damage in the protected area “Zellwald”.

For the experiments, at each of the testing plots, a 1 m<sup>2</sup> spot was selected where we simulated a 50 mm rainfall event during 15 min (high pre-event soil moisture). A 3 g L<sup>-1</sup> “Brilliant Blue” solution was applied with a watering can (Fig. 1.).

Vertical cross-sections of 1 m (width) × ~2 m (depth – depending on the depth of tracer penetration) were





**Fig. 1.** Application of the dye-tracer “Brilliant Blue FCF”.

photographed and drawn on transparent plastic foil at 25 cm intervals. Spatial maps of “Brilliant Blue FCF” distribution were derived from the digital photographs combined with the foils.

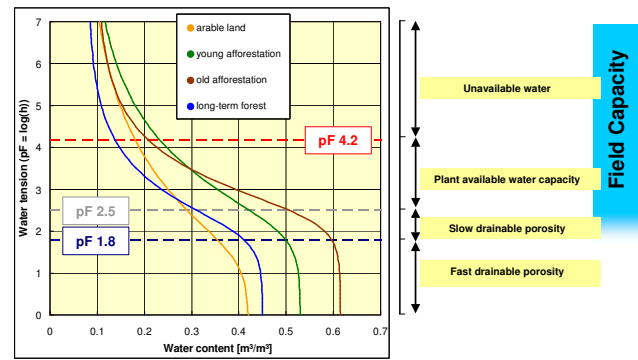
### 2.3.2 Lab measurements

Upon completion of the infiltration experiments, we extracted undisturbed soil cores (three samples per diagnostic horizon), from beneath the positions where the infiltration had been measured. These cores were used to determine (desorption) water retention curves, the unsaturated hydraulic conductivities and bulk densities. The unsaturated soil hydraulic properties were determined in the lab during transient conditions using the evaporation method (Wendroth et al., 1993) and during steady-state conditions using the hanging water column method and a pressure apparatus (Dane and Topp 2002). Hydraulic conductivities were calculated using the approach of Wind (1968).

## 2.4 Rainfall-runoff-model

To describe the effect of the changed soil hydraulic properties on the output of a rainfall-runoff-model the spatially distributed model AKWA-M was used. The model is based on the water budget model AKWA-M (Golf and Luckner, 1991; Münch, 2004). In recent years it has been advanced by Dr. Dittrich & Partner Hydro-Consult GmbH (Münch et al., 2007; Wahren et al., 2007a). This water balance and rainfall-runoff model simulates the water balance and flood runoff in watersheds and transforms the different processes from a site to a larger area. It contains physically based components (runoff generation) as well as a conceptual background (runoff concentration).

For our study, firstly only the runoff generation was considered. A detailed estimation of the influence that afforesta-



**Fig. 2.** Water retention – topsoil layer (30 cm).

tion might have on runoff-concentration (e.g. changed lateral fluxes) was not destined in this study. It would not be possible to simulate it with the chosen experimental setup, although a distinct modification by newly formed roots or changed soil hydraulic properties would be plausible. Our investigation focused on the land-use effects on the site conditions at each plot. Here the plots assume a comparable role to the hydrological response units (HRU) in a spatially distributed model.

AKWA-M calculates the runoff generation processes for HRUs. The 4 different land-uses were represented by 4 HRUs. For each considered plot two rainfall events were calculated with a duration of 2 h and the return periods of 25 (45 mm) and 100 (56 mm) years. First, each plot was parameterised in the “common” way considering land-use change by changing the vegetation parameters (root depth, leaf area index (LAI), canopy height, vegetation density, albedo, macropores, stomatal conductance etc. – cf. Münch, 2004, Münch et al., 2007) without changing the soil hydraulic properties (“unchanged soil”). Thereafter, the newly derived information on changed soil physical conditions was implemented into the model (“changed soil”) and the difference between the two model runs was assessed. The calculations were done for three initial pre-event soil moisture situations (high, intermediate, and low). In this article the model results for the initial state (arable plot) were compared with the target state (forest).

## 3 Results and discussion

### 3.1 Pore size distribution

Water retention curves (Fig. 2) were analysed in the lab. Distinct differences were detected. For all forest stands an increase of the field capacity was observed (up to the depth of 2 m). In particular the topsoil layers showed a higher portion of coarse/middle pores (Table 1). This effect decreased with the depth.

**Table 1.** Pore distribution [vol%], related field capacity, and plant available field capacity in the top layers (30 cm).

Land-use	Horizon	Pore Diameter [ $\mu\text{m}$ ]			Field Capacity	Plant available Field Capacity
		>50	50 – 10	10 – 0.2	[mm]	[mm]
Arable Land	Ap	6	5	3	106 $\pm$ 9	55 $\pm$ 16
Young Afforestation	Ah	6	9	7	149 $\pm$ 3	82 $\pm$ 13
Old Afforestation	Ah	5	14	10	179 $\pm$ 2	120 $\pm$ 21
Ancient Forest	Ah	5	11	8	129 $\pm$ 5	77 $\pm$ 12

**Table 2.** Bulk density [ $\text{g cm}^{-3}$ ], total carbon amount [%], organic matter class (AG-Boden 1994; Ad-hoc-AG Boden 2005) in top mineral soils at all investigated plots.

Land-use	Bulk Density	Total carbon amount	Organic matter class
	[ $\text{g cm}^{-3}$ ]	[%]	[-]
Arable Land	1.3 $\pm$ 0.10	1.9	h2
Young Afforestation	1.1 $\pm$ 0.20	11.1	h5
Old Afforestation	0.8 $\pm$ 0.06	12.0	h5
Ancient Forest	1.0 $\pm$ 0.09	11.6	h5

Due to the higher amount of stored carbon in forest soils, it was expected that field capacity increased from arable land over growing forest to the ancient forest. However, this was not completely confirmed by our measurements (Table 1). Interestingly, the field capacity of the ancient forests was significant lower than the corresponding values of the afforestation. This might be due to soil compaction by former forestry operations using heavy machinery. The higher bulk density of the ancient forest compared to the afforestations (Table 2) may support this suggestions. Otherwise, there is no guarantee that there are absolutely any differences in the pedological background settings between the afforested plots and the all-time-forest plot. A reason for long-term forestry land-use at that plot might be that the subsoil of this site was denser leading to water excess (stagnant).

All forest plots showed a distinct higher total carbon amount than the arable plot. No differences in the amount of coarse pores ( $\emptyset$  of pores  $\geq 50 \mu\text{m}$ ) between the different plots were found (Table 1). These amount of pores were derived from the fitted water retention curve. The fast drainable porosity is not so importing for water retention but essential for infiltration and percolation (water transport). Thus, not only the amount of the macropores, but also the soil structure is essential to characterize flood retention effects. The macropore conductivity cannot be quantified by lab tests because only small soil core samples (volumes of  $100 \text{ cm}^3$ ) were used.

### 3.2 Hydraulic conductivity and infiltration

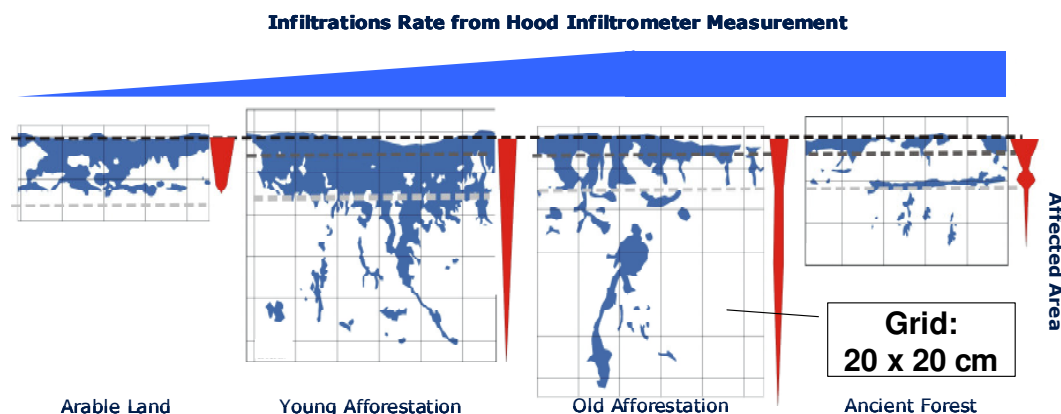
Hydraulic conductivities measured in the lab and in the field are presented in Table 3. Distinct differences between the four land-uses similar to the pore size distribution (cf. Table 1) were observed.

These results confirm the well-known fact, that the top-soil conditions in forests are more favourable for infiltration than under arable use. The hydraulic conductivities at saturation and at field capacity of the forests sites are between two and four times higher than the corresponding conductivities of the cropland site, whereby the absolute variation for replicates on the arable plot ( $\pm 180 \text{ cm d}^{-1}$ ) is lower than on the forest plots ( $\pm 300 \text{ cm d}^{-1}$ ,  $\pm 400 \text{ cm d}^{-1}$ ,  $\pm 450 \text{ cm d}^{-1}$ ). The higher small-scale heterogeneity under forest is mainly due to the presence of decayed root channels leading to spots with high infiltration rates. It mainly depends on the placement of the hood infiltrometer whether such a high permeable spot is hit or missed. Obviously, the ploughed arable land has a disturbed (destroyed) macropore structure. After infiltration, water cannot further percolate into the subsoil because the macropores are cut at the lower boundary of the plough horizon. Therefore, the infiltration capacity at the arable plot is lower than at the forest plots and less variable.

The infiltration patterns (Fig. 3) clarify, that at high rainfall intensities the water transport through the forest soils is dominated by preferential flow. In contrast to the forest soils, no macropores contributing to the infiltration beyond the plough horizon were detected at the arable plot. Figure 4a shows an isolated macropore, which was not stained by the dye tracer. This pore was cut off by the mechanical impact of the plough. In comparison to that, Figure 4b shows a connected macropore from the young afforestation plot.

Figure 3 also underlines, that the “ancient forest”-plot acts somewhat differently compared to the other test plots. The subsoil layer (deeper than 30 cm) is more compacted. The dye tracer passed the topsoil layer comparatively fast. A big portion of the blue colour remains at the bottom of the loess layer and probably drains laterally. Only some roots were able to penetrate the layer beneath.





**Fig. 3.** Infiltration patterns from dye-tracer experiment “Brilliant Blue FCF”.

**Table 3.** Unsaturated (pF 2.5) and saturated hydraulic conductivity in the top layers.

Land-use	Conductivity (pF 2.5)	Conductivity (sat.)
	cm d <sup>-1</sup>	cm d <sup>-1</sup>
Arable Land	0.011±0.02	360±180
Young Afforestation	0.026±0.05	710±300
Old Afforestation	0.043±0.10	1100±400
Ancient Forest	0.032±0.10	1200±450

### 3.3 Rainfall-runoff calculation

#### 3.3.1 Parameterisation

For the model parameterisation of afforestation, the initial state (arable plot) was compared with the “old afforestation”-plot (target state). The typical way to parameterise land-use changes in RR-models is to change the vegetation parameters. If afforestation is modelled a higher root depth is considered. It implies, that a larger part of the soil water storage can be utilised by root uptake prior to the storm event. Furthermore, an increased vegetation density leads to a higher LAI and an all-year vegetation cover leads to higher rates of interception. This will result in decreased pre-event soil moisture. Moreover, RR-models describe in general a plant specific transpiration.

It depends on the model, how the macropore flow is included. AKWA-M calculates infiltration with the SMINF model (Peschke 1982) and uses for macropores a “bypass-flow-concept” similar to the COUPMODEL approach (Jansson and Karlberg 2001). More macropores are represented by higher bypass conductivity at saturation. The results of our hood infiltrimeter measurements (cf. 3.2) support the assumption of former model calculations (Wahren et al., 2007a, b) whereby the infiltration caused by macropores under forest cover is much higher than under traditional arable use (ploughing).

We compared the two above-mentioned different plots (in AKWA-M: Subareas/HRUs). The parameterisation from the typically available soil map (LfULG 2006) for the arable plot was used and the parameters for the afforestation were assumed in two different ways – *first*: changing the in 2.4 named vegetation parameters and macropores (soil properties unchanged); *second*: changing vegetation parameters, macropores, soil hydraulic properties (soil properties changed) and adding a litter layer (Wahren et al., 2007a). The changed soil parameters for the different realisations are shown in Table 4.

#### 3.3.2 Simulation

A 20-yr water balance calculation was simulated for the three HRUs (arable, old forest unchanged, old forest changed). To display the different pre-event soil moisture situation, the empty soil storage, which is available to retain water for a certain time, was defined as:

Empty soil storage (ES) = field capacity – actual soil water content.

The different soil storage distribution functions (empirical non-exceedance probability) for the 20 yr (1984 – 2005) show that the effect of the land-use increases with decrease of the soil moisture (Fig. 5). It is also obvious, that the changed soil parameters have a distinct impact on the calculated retention potential of the HRU.

Especially in the summer months, when some of the most disastrous floods occurred in the considered region in Saxony (e.g. August 1897, July 1954, July 1981, August 2002), the deviation between the different parameterisations is pronounced. Figure 6 shows the ES-distributions for the summer month (June–August) for the topsoil layer (0–30 cm) and the layer beneath (30–95 cm).

The graphs show for the Sw-horizon (30–95 cm depth), e.g. that at 80% of the summer days there were 7 mm more soil storage available only considering the changed vegetation, but 15 mm more if the changed soil properties

**Table 4.** Soil parameters (Pore distribution [-]) for the model calculations.

		depth	Arable Land (initial)	Old Afforestation (target)		
				unchanged soil	changed soil	
litter layer	porosity	–5–0		x	x	0.60
	field capacity			x	x	0.30
	wilting point			x	x	0.10
Ap/Ah	porosity	0–30		0.43	0.43	0.62
	field capacity			0.34	0.34	0.60
	wilting point			0.18	0.18	0.20
Sw	porosity	30–95		0.40	0.40	0.47
	field capacity			0.34	0.34	0.43
	wilting point			0.19	0.19	0.19
Bt-Sd	porosity	95–150		0.37	0.37	0.41
	field capacity			0.31	0.31	0.35
	wilting point			0.17	0.17	0.19
Bt-Sd	porosity	150–200		0.41	0.41	0.41
	field capacity			0.36	0.36	0.36
	wilting point			0.23	0.23	0.23

**Table 5.** Runoff peaks from an afforested site for initial state and two model parameterisations (“unchanged soil” and “changed soil”) for the “target state” land-use (old forest) rainfall 45 mm 2 h<sup>−1</sup>.

Land-use		Runoff peaks [mm]		
		high	Pre-event soil moisture intermediate	low
Arable Land (initial)		30	27	17
Old Afforestation (target)	soil properties	17	16	13
	unchanged	−43%	−41%	−24%
	soil properties	15	14	11
	changed	−50%	−48%	−35%
Difference between both parameterisations [% of peak from initial state]		7	7	11

are taken into account too. For 50% of the summer days it was calculated:

Ah-horizon: (unchanged soil) + 6 mm

(changed soil) + 9 mm

Sw-horizon: (unchanged soil) + 17 mm

(changed soil) + 26 mm

The difference between the two parameterisations is 12 mm at 50% of the empirical non-exceedance probability for the two top layers. To estimate the influence on the runoff generation during flood events two heavy rain events were simulated. For both of these two events three pre-event soil moisture situations were considered (dry, middle, wet).

The first rainfall event has a 25-year return period and an amount of 45 mm within two hours. The compared values are the peaks of the fast runoff components (surface runoff and fast subsurface flow) from the HRU. The deviation between both parameterisations produced by considering or neglecting the changed soil hydraulic properties is shown in Table 5.

The same calculation set was applied for another rainfall event with a 100-yr return period and duration of two hours. The total amount of this event was 56 mm. The difference between the two parameterisations for all three pre-event soil moistures was 4% of the peak from the initial state.

#### 4 Synthesis and conclusion

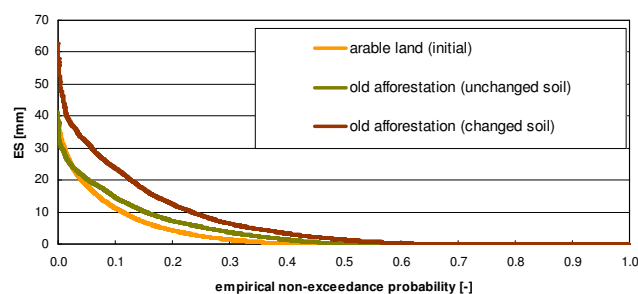
Our rainfall-runoff calculations produce clear evidence, that implementation of modified soil physical conditions into the model can more realistically describe land-use effects. With



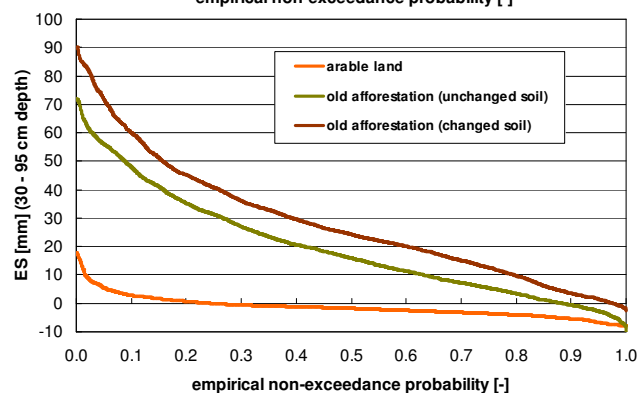
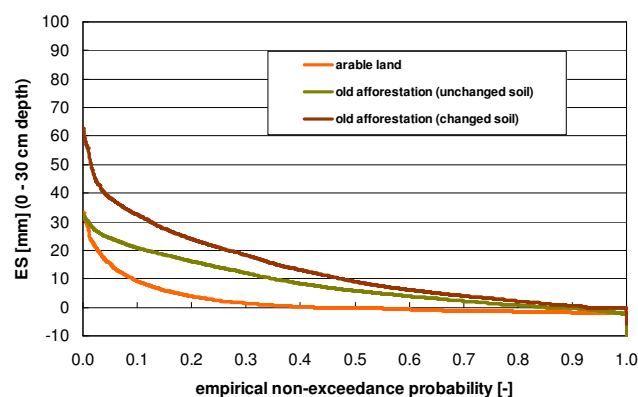
**Fig. 4a.** Isolated macropore.



**Fig. 4b.** Connected macropore.



**Fig. 5.** Empirical non-exceedance probability of empty soil storage (whole year, whole soil profile).



**Fig. 6.** Empirical non-exceedance probability of empty soil storage (summer month, top soil layer and Sw-horizon).

respect to our experimental data soil hydraulics (up to 2 m depth) is clearly related to land-use. Not only the macropores and the pre-event soil moisture are influenced by the land-use but also the water retention characteristics due to a changed pore distribution. Thus, a change in land-use and land cover will have distinct effects on infiltration and water retention. A model-based analysis of retention in catchments should take these changes into account. However, it is logical that it takes time until such changes occur, but from our data it can be concluded that already after 6 year following an afforestation distinct changes in soil physics are detectable.

Especially the topsoil layers showed an increased conductivity and a higher portion of coarse/middle pores causing an increased infiltration and soil water retention potential.

According to former studies (Wahren et al., 2007a), afforestation of arable land was calculated with AKWA-M by:

- an increase of root depth, meaning that a larger part of the soil water storage can be taken up by roots;
- an additional organic (forest floor) layer on top of the mineral soil (increasing the soil water storage capacity);
- a higher amount of organic matter in the top layers of the mineral soil increasing the soil water storage capacity (e.g. changing organic matter class (AG-Boden, 1994) from class “h2” (1–2%) to class “h5” (10–15%));
- a higher amount of macro-pores represented by a higher macro-pore conductivity.

The field observations confirmed the relations for the changed root system with respect to the changed infiltration conditions and the increased soil water storage capacity due to a organic layer (litter layer) on top of the mineral soil. The dependency of field capacity on the amount of organic matter was parameterised according to AG-Boden (1994). The practicability of this procedure is generally supported by our study. However, the suggested range (max.  $\pm 15\%$  of field capacity between organic matter classes “h0” and “h5”) does not explain the experimentally observed porosity changes. The measured difference between topsoil layer of the arable plot (class “h2”) and the topsoil layer of the three forest plots (class “h5” – cf. Table 2) would result in a field capacity increase of  $\sim 10\%$  (AG-Boden 1994; Ad-hoc-AG Boden 2005) for the observed site. This value underestimated the measured field capacity changes at the forest plots. It is well-known, that the data in AG-Boden (1994) were mainly collected from arable sites. However, mechanical impact from root growth decreasing the bulk density of the soil could be furthermore assumed. It would be eligible to have more measurements like the data from this study for further pedological background conditions.

The uncertainty in the parameterisation should not lead to a general neglect of the mentioned processes. Our study demonstrates the need of considering changes in both vegetation and soil properties in RR-models. Only such a combined approach ensures to address land-use effects in an appropriate way. The lack of relevant data on changes in soil properties should not lead to the conclusion, that land-use measures are ineffective. It is quite clear that the effectiveness of land-use changes in flood protection is limited. However, the sustainability of such practices and their synergies with respect to nature protection and soil conservation should keep the considerations about that non-structural measures vital.

The soil plays a key role considering decentral flood protection measures. It is the interface splitting precipitation into the characteristic runoff types. The relevant soil properties are affected by nearly all types of land management. Only a part of the land-use caused effects are satisfactorily implemented into models. But the biggest potential of decentral

flood retention lies in the sum of effects (infiltration, pre-event soil moisture, soil storage, surface roughness, reduced erosion risk etc. – Markart and Kohl, 1995; Laurance, 2007; Schüler, 2006; Armbruster et al., 2004; Bronstert, 2004).

Targeted measures to improve the natural retention in the watershed are long-term challenges and, thus, the appearance of the benefits may take decades. As a consequence, reliable model calculations are inevitable to estimate the actual potential of land-use strategies and their limitations. Beside the use of state-of-the-art models to predict effects for the present planning and building of flood protection strategies, also tools to predict key parameters (notably relevant soil properties) should be improved continuously in order to minimise the uncertainties.

Edited by: B. Schmalz, K. Bieger, and N. Fohrer

Reviewed by: E. Christoffels and another anonymous referee

## References

- Ad-hoc-AG Boden: Bodenkundliche Kartieranleitung (KA5 – in German), Hrsg.: Bundesanstalt für Geowissenschaften in Zusammenarbeit mit den staatlichen geologischen Diensten der Bundesrepublik Deutschland, Hannover, Germany, 5. Auflage, 438 pp., 2005.
- AG-Boden: Bodenkundliche Kartieranleitung (KA4 – in German), Hrsg.: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe und den Geologischen Landesämtern in der Bundesrepublik Deutschland, 4. Auflage, Hannover, Germany, 1994, berichtiger Nachdruck, 1996.
- Armbruster, M., Seegert, J., and Feger, K.-H.: Effects of changes in tree species composition on water flow dynamics – Model applications and their limitations, *Plant Soil*, 264, 13–24, 2004.
- Bronstert, A.: Rainfall-runoff modelling for assessing impacts of climate and land-use change, *Hydrol. Proc.*, 18, 567–570, 2004.
- Calder, I. R., Smyle, J., and Aylward, B.: Debate over Flood-proofing Effects of Planting Forests, *Nature* 450, p. 945, online available at: <http://www.nature.com/nature/journal/v450/n7172/full/450945b.html>, 12 December 2007.
- Calder, I. R.: Forest and Floods: Moving to an Evidence-based Approach to Watershed and Integrated Flood Management, *Water Int.*, 31, 87–99, 2006.
- Dane, J. H. and Topp, G. C. (Eds.): *Methods of Soil Analysis: Part 1, Physical Methods*, 3rd edition, Soil Sci. Soc. Am., Madison, WI, USA, 2002.
- EC: Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council, published in the Official Journal of the European Union, L 288/27, 22 December 2000.
- EC: Directive 2007/60/EC of the European Parliament and of the Council, published in the Official Journal of the European Union, OJ L 327, 6 November 2007.
- FAO: Sustainable use and management of freshwater resources: the role of forests, in: *State of World's Forests*, edited by: Perlis, A., Wearne, L., and Moore, B., Published by Center for International Forestry Research Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, available at: [http://www.fao.org/DOCREP/005/Y7581E/y7581e09.htm#P0\\_27](http://www.fao.org/DOCREP/005/Y7581E/y7581e09.htm#P0_27), 2003.

- Flury, M. and Flühler, H.: Brilliant Blue FCF as a dye tracer for solute transport studies – A toxicological overview, *J. Environ. Qual.*, 23, 1108–1112, 1994.
- Flury, M. and Flühler, H.: Tracer characteristics of Brilliant Blue FCF, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 59, 22–27, 1995.
- Frenzel, H.: Unterschiede in der Ausprägung physikalischer und chemischer Bodenparameter auf vergleichbarem Ausgangssubstrat in Abhängigkeit von der Landnutzung, Diplomarbeit (in German), Institute of Soil Science and Site Ecology, TU Dresden, Tharandt, Germany, 2007.
- Golf, W. and Luckner, K.: AKWA – ein Modell zur Berechnung aktueller Wasserhaushaltsbilanzen kleiner Einzugsgebiete im Erzgebirge (in German), *Acta Hydrophys.*, 32, 5–20, 1991.
- Laurance, W. F.: Environmental science: Forests and floods, *Nature*, 449, 409–410, online available at: <http://www.nature.com/nature/journal/v449/n7161/full/449409a.html>, 26 September 2007.
- LfULG: BKkonz – Bodenkonzepktkarte des Freistaates Sachsen – Ausgabe 2006, 1:50 000, online available at: <http://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/boden/13075.htm>, 2006.
- Markart, G. and Kohl, B.: Starkregensimulation und bodenphysikalische Kennwerte als Grundlage der Abschätzung von Abfluss- und Infiltrationseigenschaften alpiner Boden-/Vegetationseinheiten (in German), Ergebnisse der Beregnungsversuche im Mustereinzugsgebiet Löhnersbach bei Saalbach in Salzburg, FBVA-Bericht Nr. 89, 38 pp., 1995.
- Münch, A., Dittrich, I. and Wahren, A.: The Effects of Changes in Tree Species Composition and of Afforestation on Water Budget and Flood Dynamics Calculated with AKWA-M, Ore Mountains, in: *Progress in Hydro Science and Engineering*, edited by: Feger, K. H., Wang, Y., Bernhofer, C., and Seegert, J., Dresden Water Center Volume 3/2007, Dresden, Germany, ISBN: 978-3-86780-074-7, 331–337, 2007.
- Münch, A.: AKWA-M – Teilflächen basiertes Wasserhaushalts- und Hochwassermodell (in German), Dr. Dittrich & Partner Hydro-Consult GmbH, Bannewitz, Germany, 2004.
- Peschke, G.: Die mathematische Modellierung des Infiltrationsprozesses unter dem Gesichtspunkt ihrer hydrologischen Nutzung (in German), PhD thesis, TU Dresden, Faculty of Forest, Geo and Hydro Sciences, 1982.
- SächsWG: Sächsisches Wassergesetz, Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft, 2004.
- Schüler, G.: Identification of Flood-generating Forest Areas and Forestry Measures for Water Retention, *Forest, Snow Landscape Res.*, 80, 99–114, 2006.
- Schulla, J. and Jasper, K.: Model Description WaSiM-ETH, Internal report, IAC, ETH Zürich, Switzerland, 166 pp., 2001.
- Schwärzel, K. and Punzel, J.: Hood Infiltrometer – a new type of tension infiltrometer, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 71, 1438–1447, 2007.
- Wahren, A., Schwärzel, K., Feger, K. H., Münch and, Dittrich, A.: Identification and model based assessment of the potential water retention caused by land use changes, *Adv. Geosci.*, 11, 49–56, online available at: <http://www.adv-geosci.net/11/index.html>, 2007a.
- Wahren, A., Schwärzel, K., and Feger, K. H.: Flood formation based on contrasting socio-economically founded land-use scenarios, *Proceedings of the Scientific Conference on “Integrated catchment management for hazard mitigation”*, Trier, Germany, 60–68, available at: <http://ubt.opus.hbz-nrw.de/volltexte/2007/438/>, 2007b.
- Wahren, A., Schwärzel, K., and Feger, K. H.: Uncertainties in the parameterisation of rainfall-runoff-models to quantify land-use effects in flood risk assessment. In: Samuels, P., Huntington, S., Allsop, W., Harrop, J. (Eds.): *Flood Risk Management: Research and Practice*, CRC Press/Balkema Proceedings and Monographs in Engineering, Water and Earth Science, pp. 1479 – 1483, Taylor & Francis Group, London, ISBN: 978-0-415-48507-4, 2008.
- Wendroth, O., Ehlers, W., Hopmans, J. W., Kage, H., Halbertsma, J., and Wösten, J. H. M.: Reevaluation of the evaporation method for determining hydraulic functions in unsaturated soils, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 57, 1436–1443, 1993.
- Wind, G. P.: Capillary conductivity data estimated by a simple method (1968), in: *Proc. UMESCO/IASH Symp. Water in the unsaturated zone*, edited by: Rijtema, P. E. and Wassink, H., 1, 181–191, 1996.

### Anhang 3:

**WAHREN A., FEGER K.H. (2010): Model-Based Assessment of Forest Land Management on Water Dynamics at Various Hydrological Scales – A Case Study, in: Bredemeier, M.; Cohen, S.; Godbold, D.L.; Lode, E.; Pichler, V.; Schleppi, P. (Eds.): Forest Management and the Water Cycle - An Ecosystem-Based Approach, Ecological Studies 212, Springer: 453-469.**

Gesamter Artikel:

[http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-90-481-9834-4\\_25](http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-90-481-9834-4_25)

#### **Anhang 4:**

**WAHREN A., FRANK S., WALTHER P., SCHMIDT W., FEGER K.H. (2011): Erstellung eines Leitfadens für Ausgleichsmaßnahmen auf landwirtschaftlich genutzten Flächen in den Hochwasserentstehungsgebieten Sachsens, Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 55: 155-165.**



Andreas Wahren, Susanne Frank, Petra Walther, Walter Schmidt und Karl-Heinz Feger

# Erstellung eines Leitfadens für Ausgleichsmaßnahmen auf landwirtschaftlich genutzten Flächen in den Hochwasserentstehungsgebieten Sachsens

**A guideline for the assessment of flood-reducing compensation measures on agricultural land in flood-generating areas of Saxony**

Als Reaktion auf das schwere Augusthochwasser 2002 wurde in Sachsen bei der Novellierung des Wassergesetzes die Schutzkategorie „Hochwasserentstehungsgebiet“ (HWEg) eingeführt. Der Gesetzestext schreibt vor, dass unvermeidbare Verschlechterungen des natürlichen Wasserversickerungs- und Wasserrückhaltevermögens in HWEg durch Kompensationsmaßnahmen auszugleichen sind (SÄCHSWG 2004). Für den behördlichen Vollzug wurde daher ein Leitfaden entwickelt, der schwerpunktmäßig landwirtschaftliche Ausgleichsmaßnahmen in der Fläche bewertet. Ziel des Leitfadens ist es, mit allgemein verfügbaren Flächendaten (Böden, Gefälle, Landnutzung) die Wirksamkeit von hochwassermindernden Maßnahmen auf landwirtschaftlichen Flächen in Abhängigkeit von den Standortfaktoren übersichtlich darzustellen und praxisorientiert die Flächen- bzw. Maßnahmenauswahl zu unterstützen. Gleichzeitig wird vertiefend ein quantifizierender Bewertungsansatz vorgestellt.

**Schlagwörter:** Ausgleichsmaßnahme, Hochwasserentstehungsgebiete, landwirtschaftliche Flächen, Leitfaden, Wasserrückhalt, Wasserversickerung

In response to the heavy flood in August 2002, the State of Saxony established a new protection category in its revised Water Act: the flood-generating areas. For the governmental enforcement a guideline was developed to assess the effectiveness of flood-reducing compensation measures on agricultural land. The law demands that inevitable degradations of the natural infiltration or the water-retention potential in flood-generating areas have to be compensated. The aim of the new guideline is to assess the effectiveness of agricultural flood-mitigation measures from generally available spatial information (soils, slope, land-use) with regard to the site conditions in order to support the practice-oriented selection of areas and measures of compensation. In addition, a more detailed, quantifying assessment approach is presented.

**Keywords:** Agricultural land, compensation measures, flood-generating areas, guidelines, natural infiltration, water retention

## 1 Hintergrund und Anlass

Die möglichst umfassende Nutzung des natürlichen Wasserrückhalts in der Fläche ist eine wesentliche Komponente effektiver und nachhaltiger Hochwasserschutzstrategien. Als präventivem Element kommt dabei einer Landnutzung, die den natürlichen Wasserrückhalt verbessert, eine wichtige Bedeutung zu. Acker- und Grünlandnutzung sind in vielen Einzugsgebieten die flächenmäßig dominierenden Nutzungsarten. Die landwirtschaftliche Nutzung greift direkt und indirekt über die Art des Pflanzenbestandes und die Bodenbearbeitung in den Bodenwasserhaushalt ein und beeinflusst dadurch auch die Abflussbildung. Die Landwirtschaft ist somit ein wesentlicher Nutzer von Flächen, welche die Entstehung von Hochwasser beeinflussen.

Für den dezentralen Hochwasserschutz ist es daher von zentraler Bedeutung, im standörtlichen wie auch regionalen Maßstab landwirtschaftliche Nutzungen quantifizierend zu analysieren (vgl. RIEGER & DISSE 2009).

## 2 Hochwasserentstehungsgebiete

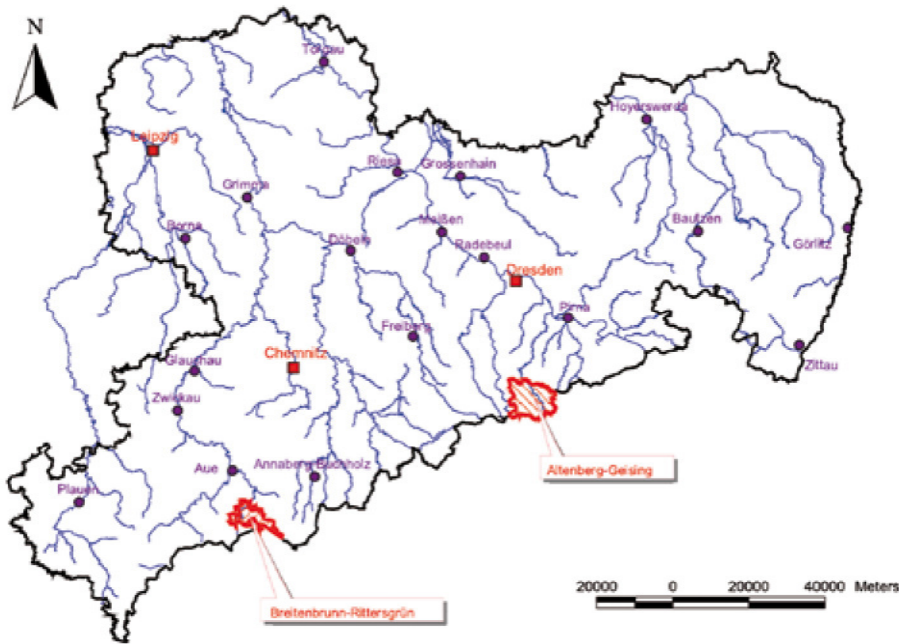
Im SÄCHSWG § 100b werden Hochwasserentstehungsgebiete wie folgt definiert: „Gebiete in Mittelgebirgs- und Hügellandschaften, aus denen bei Starkniederschlägen oder bei Schneeschmelze in kurzer Zeit so große Wassermengen abfließen können, dass daraus eine Hochwassergefahr entsteht“. Die Auswei-

sung von HWEg hat zum Ziel, die Hochwassergefahr durch Verbesserung bzw. Erhalt des natürlichen Wasserversickerungs- und Wasserrückhaltevermögens bereits in den Entstehungsgebieten zu minimieren. Pilotgebiete zur Festsetzung waren die HWEg „Geising-Altenberg“ (Landesdirektion Dresden) und „Breitenbrunn-Rittersgrün“ (Landesdirektion Chemnitz) (Abb. 1). Weitere HWEg sind festgelegt worden bzw. werden zur Auslegung vorbereitet (LFULG 2008).

Dabei gilt es, den natürlichen und nutzungsbedingten Beitrag zur Hochwasserentstehung bzw. -prävention möglichst realitätsnah und für den behördlichen Vollzug nachvollziehbar zu bewerten. Darauf basierend lassen sich umsetzungsfähige Maßnahmen und Ausgleichs- bzw. Entschädigungsmodelle für landwirtschaftliche Flächen ableiten und im Sinne des SÄCHSWG (2004) umsetzen.

Bezüglich der zu beschreibenden hydrologischen Prozesse sind hier vorrangig zu nennen: Infiltration und Wassertransport im Boden unter zeitlich variierenden Rahmenbedingungen (Bewuchs, Stabilität des Bodengefüges sowie die Vorfeuchte durch artspezifischen und entwicklungsabhängigen Wasserentzug durch die Wurzeln). Die Vorsättigung des Bodens sowie die Dauer und Intensität des hochwasserauslösenden Niederschlagsereignisses verursachen jedoch einen unterschiedlichen Wirkungsgrad einer bestimmten hochwassermindernden Maßnahme. Neben der Ereignisspezifität ist auch der Bezugspunkt, an dem die Wirkung (z.B. Durchflussscheitelreduktion) eintreten soll, von entscheidender





**Abbildung 1**

Lage der im Jahr 2009 festgesetzten Hochwassererzeugungsgebiete (LFULG 2010)  
Locations of the flood-generating areas as defined in 2009

Bedeutung. Eine allgemein gültige Bewertung landwirtschaftlicher Maßnahmen ist aber auch deshalb unmöglich, weil die Problematik der Nachbarschaftsbeziehungen, der Verknüpfung von Raumeinheiten und deren quantifizierbare hydraulische Anbindung an das Gewässer in der hydrologischen Wissenschaft nach wie vor ungeklärt sind (vgl. KLEEBERG 1999). Nicht jede Fläche in einem Landschaftsausschnitt kann demnach als „beitragend“ oder „aktiv“ definiert werden. Die Bewertung der Wirksamkeit solcher Maßnahmen ist durch räumlich verteilte Niederschlags-Abfluss-Modelle begrenzt darstellbar, die nach Möglichkeit physikalisch basiert und besonders hinsichtlich der Vegetations- und Bodeneigenschaften standörtlich differenziert sein sollen.

Für den praktischen Vollzug ist die detaillierte, modellgestützte Bewertung jedoch oft zu aufwändig. Deshalb wurden in einem Leitfaden die Wirkmechanismen von landwirtschaftlichen Nutzungsänderungen zusammengefasst und ein Bewertungssystem entwickelt, das für flächenhaft verfügbare Daten zu Bodeneigenschaften den Einfluss einer Landnutzungsänderung auf die Hochwasserentstehung analysiert (LFULG 2010). Grundlage für die entstandene Bewertungsmatrix (Tab. 2) war die Auswertung wichtiger nationaler und europaweiter Projektvorhaben, die sich nach den Hochwasserereignissen 2002 mit dem Einfluss der Landnutzung auf Hochwasser beschäftigten (z.B. SMI 2006, RICHERT et al. 2007, SCHÜLER et al. 2007, SIEKER 2007, SCHMIDT et al. 2008, SEIDEL 2008, WAHREN et al. 2008, PICHLER et al. 2009, REINHARDT et al. 2009, RIEGER & DISSE 2009, SAMUELS et al. 2009a und 2009b, WAGNER et al. 2009 u.a.).

### 3 Präventiver Hochwasserschutz durch Maßnahmen in der Landwirtschaft

Die landwirtschaftliche Bewirtschaftung einer Fläche beeinflusst maßgeblich deren bodenhydrologische Eigenschaften und damit den Standortwasserhaushalt und die Abflussbildung. Neben

dem auf einer Ackerfläche praktizierten Bodenbearbeitungsverfahren wirken sich auch Art und Dauer der Bodenbedeckung auf die Abflussentstehung aus. Gezielt angepasste landwirtschaftliche Nutzung kann Abflussbildungs- und Abflusskonzentrationsprozesse beeinflussen und so das Hochwasserentstehungsrisiko mindern. Drei Wirkungskomplexe sind bei der Analyse der Wirkung hochwassermindernder Maßnahmen bedeutsam (SIEKER 2007, LFULG 2009a), wobei diese allgemein und nicht ausschließlich für landwirtschaftliche Flächen gelten:

- Infiltrationsförderung
- Vergrößerung des Speichervermögens an der Oberfläche (Muldenspeicher) und des Speichers im Boden
- Rückhalt und/oder Verzögerung bereits entstandener schneller Abflusskomponenten (z.B. Oberflächenabfluss).

Auf landwirtschaftlichen Flächen, für die der Leitfaden erarbeitet wurde, lässt sich eine Steigerung der Infiltrationsleistung

eines Bodens (a) beispielsweise durch bestimmte Bodenbearbeitung und Bestellverfahren, durch Nutzungsänderung oder durch die Anpflanzung von Feldgehölzen erreichen. Erhöhte Infiltration kann z.B. auf tiefgründigeren Böden freie, d.h. bisher für den Wasserrückhalt noch ungenutzte Bodenspeicher erschließen. Dadurch kann die Entstehung von Oberflächenabfluss verzögert und retardierende unterirdische Abflusskomponenten wie langsamer Interflow sowie Tiefenversickerung gefördert werden. Die Infiltrationsleistung eines Bodens ist zum einen von der Wasserdurchlässigkeit der Bodenoberfläche und zum anderen von der Porengrößenverteilung und der Porenkontinuität abhängig (LEICHT 2008). Aus dieser Porenstruktur resultieren die bodenhydraulischen Eigenschaften eines Standortes.

Auch die Bodenfeuchtedynamik beeinflusst die Abflussbildung. Hier geht es vorrangig um die „Vorfeuchte“, d.h. den Bodenwassergehalt zu Beginn des Hochwasser auslösenden Niederschlagsereignisses. Auf einem Boden mit geringer Vorfeuchte und entsprechend größerem Speichervermögen verzögert sich das Auftreten von Sättigungsabfluss an der Oberfläche im Vergleich zu einem Boden mit hoher Vorfeuchte. Darüber hinaus wirkt eine günstige Bodenstruktur infiltrationsfördernd. So tragen stabile Bodenaggregate dazu bei, Bodenverschlammung und Verdichtungen in der Oberkrume und im Unterboden entgegenzuwirken und folglich den Oberflächenabfluss zu mindern.

Neben der Infiltrationsförderung stellt auch oberflächiger Wasserrückhalt in Form eines Muldenspeichers (aus Punkt b) eine Möglichkeit des flächenhaften Wasserrückhalts dar. Die Ausbildung des Mikroreliefs quer zum Hang durch höhenlinienparallele Bodenbearbeitung steigert flächenhaft die Infiltration und Evapotranspiration. Die Entstehung eines hochwasserwirksamen Oberflächenabflusses, also der Zeitpunkt, an dem die Niederschlagsintensität die Infiltrationsrate übersteigt, lässt sich dadurch hinauszögern oder im Einzelfall sogar verhindern. In

Sachsen ist die höhenlinienparallele Bearbeitung auf Grund der gegebenen Feldstrukturen jedoch häufig nicht praktikierbar.

Mehrfährige, tiefwurzelnde Pflanzen haben das Potential, nachhaltig den Mittel- und Grobporenanteil des Bodens und somit den verfügbaren Bodenwasserspeicher zu erhöhen (z.B. WAHREN et al. 2009).

Maßnahmen der Flurgestaltung ermöglichen den Auffang oder zumindest eine Verzögerung des bereits entstandenen Oberflächenabflusses (c). Die räumliche Gliederung landwirtschaftlicher Nutzflächen durch Feldgehölze oder Hecken schafft Fließwiderstände für oberflächlich abfließendes Wasser. Die nachträgliche Infiltration des Niederschlages und die damit einhergehende Speicherung im Boden unterbrechen den Zufluss schneller Abflusskomponenten zum Vorfluter.

Bei der Betrachtung dezentraler Hochwasserreduzierungsmaßnahmen in überwiegend landwirtschaftlich genutzten Gebieten (z.B. Mulde: SIEKER 2007, Weißeritz: RICHERT et al. 2007) wurde der konkrete Einfluss meliorativer Maßnahmen nicht näher untersucht. In Abhängigkeit von der Wirkung bestehender Dränagen auf das Abflussverhalten kann der Wasserrückhalt in der Fläche durch die Einbringung weiterer Dränagen oder durch die Deinstallation bestehender Dränagen verbessert werden (vgl. BRONSTERT et al. 1993). Literaturstudien zeigen, dass zwei gegenteilige Auffassungen vertreten sind (WOHLRAB 1992, AKKERMANN 2004): Eine Auffassung beschreibt eine hochwasserreduzierende Wirkung von Drainagen (z.B. ARMSTRONG & GARWOOD 1991, WISKOW & VAN DER PLOEG 2003). Die Begründung hierfür ist, dass der Bodenspeicher durch Drainagen schnell entleert wird und somit für folgende Niederschlagsereignisse erheblich mehr Speicherpotential zur Verfügung steht. Die andere Auffassung, nach welcher Drainagen hochwasserfördernd wirken, lässt sich mit dem beschleunigten Abfluss begründen (z.B. KAO 1980, SIEKER 2007). Das in den Boden infiltrierte Wasser wird dem Vorfluter so schnell zugeführt, dass das Hochwassergeschehen verstärkt wird. Eine allgemeingültige Bewertung der Wirkung von Drainagen ist nicht möglich und ist somit im Bedarfsfall gesondert zu prüfen.

Im Rahmen dieses Beitrags wurde die Eignung von Hochwasser mindernden Maßnahmen in der Fläche in Bezug auf die Standorteigenschaften bewertet. Deshalb beziehen sich die folgenden Ausführungen auf flächenhafte Maßnahmen. Punktuelle oder linienhafte Maßnahmen, die zur Hochwasserreduzierung beitragen, wie Maßnahmen der Flurgliederung und Maßnahmen entlang von Flussläufen, werden im Folgenden nicht betrachtet. Auch die Ausführung des Wegebbaus sowie Kleinstückhalte werden eher den technischen Maßnahmen zugeordnet. Hierzu liegen dem behördlichen Vollzug in Sachsen bereits Bewertungsansätze vor. In Tabelle 1 sind Maßnahmen, die den flächenhaften Wasserrückhalt gemäß der erläuterten Wirkungsmechanismen (a) und (b) verbessern und somit zur Hochwasserreduzierung beitragen, zusammengefasst.

#### 4 Bewertungsansätze

Das im SÄCHSWG (2004) geforderte Verschlechterungsverbot in HWEGen kann mit Ansätzen der Naturschutzgesetzgebung verglichen und deren Vollzugsstrategie übertragen werden. Gemäß §13 BNATSCHG (2010) soll sich z.B. der aktuelle Zustand von Natur und Landschaft nicht verschlechtern. Das Vermeidungs- und Minimierungsgebot besagt, dass die Inanspruchnahme von Natur und Landschaft durch bauliche Vorhaben zwingend auf das erforderliche Maß zu beschränken ist. Lässt sich eine Beeinträchtigung von Natur und Landschaft nicht vermeiden, so erfordert das Kompensationsgebot, dass der Vorhabensträger einen Schadenersatz in Form eines Ausgleiches und/oder Ersatzes der Beeinträchtigungen durch räumlich und funktional geeignete Naturschutzmaßnahmen zu erbringen hat (§15(2) BNATSCHG 2010).

Zur Bewertung und Bilanzierung von Eingriffsfolgen sowie zur Ableitung des Kompensationsbedarfs existiert im Freistaat Sachsen eine Handlungsempfehlung. Im Rahmen dieser Empfehlung ist der dezentrale Wasserrückhalt in der Fläche noch nicht explizit als ausgleichende Funktion berücksichtigt. Die zentrale Stellung des Bodens im Wirkungsgefüge des Naturhaushaltes wird zwar herausgestellt, dessen Rolle im Landschaftswasserhaushalt ist jedoch noch nicht verankert. Unterschieden wird zwischen Ausgleich und Ersatz entsprechend funktionaler, räumlicher und zeitlicher Aspekte. Ausgleichbare Wertminderungen werden durch Ausgleichsmaßnahmen bilanziert, nicht ausgleichbare Wertminderung und die Bilanzierung des biotopbezogenen Ersatzes erfolgt durch Ersatzmaßnahmen (BRUNS & KÖPPEL 2003). Ziel der Bilanzierung ist die Bereitstellung einer Argumentationshilfe zum Nachweis der Gleichwertigkeit ungleichartiger Kompensation. In diesem Verfahren erfolgt die Quantifizierung durch die Festlegung von Ausgangswert, Wertminderung und Zustandswert. Der ausgleichende Differenzwert quantifiziert die Differenz zwischen Ausgangssituation vor dem Eingriff (Ausgangswert) und Ist-Zustand nach dem Eingriff (Zustandswert). Die Ausgleichbarkeit lässt sich aus der Wiederherstellbarkeit ableiten. Die Berechnung erfolgt in Werteinheiten. Sind die Werteinheiten der ausgleichbaren Wertminderung näherungsweise gleich denen einer durch Ausgleichsmaßnahmen erreichten Wertsteigerung, so ist der bilanzmäßige Ausgleich erreicht. Ergeben sich Ausgleichsüberschüsse bzw. -defizite, so werden diese auf den zu leistenden Ersatzumfang angerechnet.

**Tabelle 1**  
Maßnahmen des vorbeugenden Hochwasserschutzes in der Landwirtschaft (LFULG 2010)  
*Options of flood-reducing measures in agricultural practices*

Maßnahmengruppe	Maßnahmen
Bodenbearbeitung und Bestellverfahren	Direktsaatverfahren dauerhaft konservierende Bodenbearbeitung mit Mulchsaat Maßnahmen zur Vermeidung von Bodenverdichtung Konturnutzung Tiefenlockerung Zwischenfruchtanbau und Untersaaten
Nutzungsänderung	Flächenstilllegung Entsiegelung Umwandlung von Acker in Extensivgrünland Extensivierung von Intensivgrünland Anlage mehrjähriger Kulturen (z.B. Energiegehölze) Aufforstung



Ein ähnlicher Bewertungsansatz zur quantitativen und qualitativen Einschätzung ist auch für HWEGe zu empfehlen. Zur standortspezifischen Quantifizierung von Art und Umfang adäquater Ausgleichsmaßnahmen in HWEGen ist das nachfolgend beschriebene 6-stufige Vorgehen zielführend (LFULG 2010).

### Ausgangssituation

Auf einer Fläche A ist durch Landnutzungswechsel eine Verschlechterung zu erwarten, die auf Fläche B durch eine Optimierung landwirtschaftlicher Bearbeitungstechniken kompensiert werden soll.

#### 1. Fundierte Standortsbewertung der Fläche A

Gründigkeit und Schichtung des Bodens müssen im Rahmen einer Kartierung erfasst und Leitbodenprofile abgeleitet werden. Darüber hinaus sind Infiltrationsmessungen sowie eine Profilaufnahme (Messung bodenphysikalischer Parameter im Labor) zur Bestimmung des Wasserretentionsvermögens des Bodens in verschiedenen Tiefen erforderlich. Aus diesen Daten lässt sich die räumliche Verteilung des Senkenpotentials ableiten.

#### 2. Verschlechterungsbewertung der Fläche A

Standortsbezogene oder räumlich verteilte Niederschlag-Abfluss-Modelle wie z.B. BROOK90 (FEDERER 1995), AKWA-M\* (MÜNCH 2008), WASIM-ETH (SCHULLA & JASPER 2007) u.a. ermöglichen einen Vergleich des Zustands der Fläche A vor (gemessen) und nach dem Landnutzungswechsel (prognostiziert). Infiltrationsvermögen und Wasserrückhaltevermögen werden bewertet. Wichtige Parameter stellen der wiederauffüllbare Porenraum, die hydraulische Leitfähigkeit sowie die mittlere Vorgeuchte in der Vegetationszeit (März–Oktober) dar. Die Reaktion der Fläche auf Niederschläge unterschiedlicher Intensität, Dauer (D) und Wiederkehrintervall (T) (z.B.  $D = 1\text{h}$ ,  $T = 10\text{a}$ ,  $100\text{a}$ ;  $D = 1\text{d}$ ,  $T = 10\text{a}$ ,  $100\text{a}$ ) kann somit eingeschätzt werden. Anhand von Simulationsergebnissen zur Bodenspeicherfüllung und Interzeptionskapazität lässt sich die Entstehung schneller Abflusskomponenten in Abhängigkeit der Nutzungsart ableiten (z.B. RIEGER & DISSE 2009).

#### 3. Quantifizierung der Wertminderung

Die Ermittlung einer Kompensationszahl, welche den Grad der Verschlechterung angibt, lässt sich schließlich mittels eines Punktesystems mit Werteinheiten, in Anlehnung an das Vorgehen bei der Eingriffsregelung in Sachsen (BRUNS & KÖPPEL 2003), vornehmen.

#### 4. Maßnahmenauswahl

Die Zusammenstellung einer Liste mit adäquaten Ausgleichsmaßnahmen erfolgt in Abhängigkeit der Eignung einer Fläche B zum Hochwasserrückhalt. Die Effektivität einer Maßnahme kann je nach standörtlichen Rahmenbedingungen mehr oder weniger hoch sein. Hier kommt für die Variantenprüfung der Flächen- bzw. Maßnahmenauswahl die unter Tabelle 2 vorgestellte Bewertungsmatrix zum Einsatz.

#### 5. Ausgleich

Das Auswahl- und Festlegungsverfahren wird mit der Festlegung des Flächenbedarfs sowie einer Verbesserungsbewertung durch die Umsetzung der geplanten Ausgleichsmaßnahme abgeschlossen. Eine vollständige Kompensation des Eingriffes tritt ein, wenn die Werteinheit der Verbesserung durch die Ausgleichsmaßnahme gleich der Werteinheit der Verschlechterungsbewertung ist, also die Kompensationszahl erreicht.

#### 6. Kontrollmessungen

Die Wirksamkeit der angewandten Maßnahme(n) lässt sich mittels Kontrollmessungen prüfen.

Die tatsächliche Bewertung der hochwasserrelevanten Änderung einer Fläche nach einem Eingriff bleibt auch mit diesem intensiven Verfahren ereignisbezogen (Vorgeuchte, Niederschlagsintensität usw.), unsicher (z.B. bei Übertragung von Punktmessungen in die Fläche) und in der Wirkung schwer kommunizierbar (Bezugsquerschnitt bzw. Einzugsgebiet, für das die Hochwasseränderung bewertet wird). Weiterhin können langfristige Änderungen durch Monitoring/Kontrollmessungen auch erst nach ihrem Eintreten (oft nach Ablauf mehrerer Jahre) belegt werden. Für die praktische Umsetzung war jedoch eine generelle Bewertung zu entwickeln, welche mit vertretbarem Aufwand Aussagen liefert, die im behördlichen Vollzug praktikabel und für Variantenbetrachtungen geeignet sein müssen. Es wurde ein Ansatz erarbeitet, der flächendeckend verfügbare Kartenwerke (Bodenkonzeptkarte BKKONZ 1:25.000, 2005) und den bodenkundlichen Bewertungsrahmen der KA5 (AD-HOC-AG BODEN 2005) nutzt. Die Aussagen aus den genannten Kartenwerken sind aggregiert und folglich mit Unsicherheiten behaftet. Diese für die gesamte Landesfläche vorhandenen Bodendaten stellen jedoch eine einheitliche Grundlage dar, auf die sich der Vollzug beziehen kann. Sie dienen auch anderen politischen Entscheidungswerkzeugen (z.B. in Regionalplanung, Naturschutz) als Basis und sind demnach in der Praxis weit verbreitet und akzeptiert (z.B. VORDERBRÜGGE & FRIEDRICH 1998).

In Tabelle 2 ist ein semi-quantitativer Bewertungsansatz abgebildet, der zur Vorab-Einschätzung und Eignungsbewertung von Ausgleichsmaßnahmen in HWEGen herangezogen werden kann. Die Bewertung von Standorten hinsichtlich ihrer Bodeneigenschaften ist grundsätzlich dann relevant, wenn es sich um eine Maßnahme in der Fläche handelt. Die Wirksamkeit von Maßnahmen der Bodenbearbeitung und Nutzungsänderungen sind weitgehend abhängig von standörtlichen Voraussetzungen und finden aus diesem Grund Berücksichtigung in der Bewertungsmatrix (Tab. 2). So kommen z.B. die positiven Eigenschaften der Direktsaat insbesondere auf schluffigen bis lehmigen, tiefgründigen Böden, welche zur Verschlämung neigen, zum Tragen (SIEKER 2007).

Die nicht aufgeführten Maßnahmen an Flussläufen (z.B. Gewässerandstreifen, Renaturierung) oder Maßnahmen der Flurstrukturierung (z.B. Schlaguntergliederung durch Hecken oder Grünstreifen) sind vorwiegend dazu geeignet, bereits entstandenen (Oberflächen-) Abfluss zu verzögern oder zu speichern. Sie sind weniger abhängig von standörtlichen Rahmenbedingungen und können ihre Wirkung unabhängig von den Flächeneigenschaften im Einzugsgebiet entfalten. Sie sind insbesondere dann zu empfehlen, wenn tatsächlich Oberflächenabfluss zu erwarten ist. Das Rückhaltevolumen solcher Maßnahmen lässt sich mittels hydraulischer Modellierung für den entsprechenden Gewässerabschnitt ermitteln.

Flurstrukturierung und Maßnahmen an Flussläufen sind immer unterstützend zu empfehlen und besonders dann zu bevorzugen, wenn keine geeigneten Standorte für flächenhaft wirksame Maßnahmen gefunden werden können. Generell sollten Maßnahmen der Flurstrukturierung und Maßnahmen an Flussläufen mit wasserinfiltrationsfördernden Maßnahmen auf darüber liegenden Flächen kombiniert werden.

Tabelle 2 Wirksamkeit landwirtschaftlicher Maßnahmen in Abhängigkeit verschiedener Bodeneigenschaften (LFULG 2010) Effectiveness of flood-reducing measures in dependence on soil properties																								
Maßnahmen	1. Bodenart				2. Skelettgehalt - Grobbodenanteil			3. Gründigkeit				4. Hangneigung			5. Substrat		6. Stauhizont			7. Grundwasser				
	Sande	Lehme	Schluffe	Tone	Sehr schwach (< 2 % Volumenanteil)	schwach bis mittel (2 - 25 % Volumenanteil)	stark bis extrem stark (> 25 % Volumenanteil)	flach ≤ 30 cm	mittel > 30 - 70 cm	tief 70 - 150 cm	sehr tief > 150 cm	nicht geneigt (< 2°, < 3,5 %)	schwach geneigt (2 - 5°, 3,5 - 9 %)	mittel bis stark geneigt (> 5°, > 9 %)	keine Verschlämmung	neigt zur Verschlämmung	Oberflächennah	tief (> 60 cm)	ja	nein	Oberflächennah (< 50 cm)	Grundwasserbeeinflusst (50 - 100 cm)	Grundwasserfern (> 100 cm)	
Bodenbearbeitung und Bestellverfahren	+	+++	+++	+	++	+	0	0	++	++	+++	+++	+++	++	+	++	+++	++	++	+	+	+	++	+
	+	+++	+++	+	++	+	0	0	++	++	+++	+++	+++	++	+	++	+++	++	++	+	+	+	++	+
	++	++	++	+	++	+	0	0	++	++	+++	+++	+++	++	+	++	++	++	++	+	+	+	++	+
	0	++	++	++	+	+	+	++	++	+	++	+	+++	++	+	++	+	+++	++	+	+	+	+	+
	+	++	++	-	++	+	0	0	+	++	+++	+++	++	+	0	+	+	+++	+++	+	+	-	-	+
	+	+++	+++	+	++	+	0	0	+	+	+++	+++	++	+	+	+	++	++	+	+	+	++	+	+
	+	+++	+++	+	++	+	0	0	+	+	+++	+++	++	+	+	+	++	++	+	+	+	++	+	+
	+	+++	+++	+	++	+	0	0	+	+	+++	+++	++	+	+	+	++	++	+	+	+	++	+	+
Nutzungsänderung	+	+++	+++	+	++	+	0	0	+	+	++	+++	+++	+	+	+	+++	+++	+	+	+	++	+	+
	++	+++	+++	+	++	++	++	+	++	++	+++	+++	++	+	+	+	++	++	+	+	+	++	+	+
	+	+++	+++	+	++	+	0	0	++	++	+++	+++	++	+	+	+	++	++	+	+	+	++	+	+
	+	+++	+++	+	++	+	0	0	+	++	+++	+++	++	0	+	+	+	++	++	+	+	++	+	+
	+	+++	+++	++	++	+	0	0	+	++	+++	+++	++	+	+	+	++	++	+	+	+	++	+	+
	+	+++	+++	++	++	+	0	0	+	++	+++	+++	++	+	+	+	++	++	+	+	+	++	+	+
	+	+++	+++	++	++	+	0	0	+	++	+++	+++	++	+	+	+	++	++	+	+	+	++	+	+
	+	+++	+++	++	++	+	0	0	+	++	+++	+++	++	+	+	+	++	++	+	+	+	++	+	+
+ + + ... sehr positiv; ++ ... positiv; + ... wirksam; 0 ... wirkungslos; - ... Verschlechterung																								

„+++“...sehr positiv; „++“...positiv; „+“...wirksam; „0“...wirkungslos; „-“...Verschlechterung

Ausgangssituation ist, dass infolge Flächeninanspruchnahme eine Ausgleichsmaßnahme auf einer landwirtschaftlich genutzten Fläche in einem HWEG erforderlich wird. Die Matrix in Tabelle 2 ermöglicht die Einschätzung der Eignung einer Fläche für die vorgeschlagene Ausgleichsmaßnahme. Die hier betrachteten Ausgleichsmaßnahmen sind im Allgemeinen wirksam und erhalten die Kennzeichnung „+“. Kann die positive Wirkung durch eine ungünstige Kombination von Bodeneigenschaften und Hochwasserschutzmaßnahme nicht erreicht werden, so entsteht die Kennzeichnung „0“. Tritt aufgrund einer solch ungünstigen Kombination gar eine Hochwasserverschärfung ein, so wird dies durch ein „-“ gekennzeichnet. Mit Ausnahme der Extensivierung von Intensivgrünland und der Entsieglung versteht sich die Wirkung stets im Vergleich zu konventioneller Ackernutzung mit Pflugbearbeitung. Die Kennzeichnung „++“ zeigt die Kombinationen aus Maßnahme und Bodeneigenschaft an, die gut geeignet scheinen, den Hochwasserrückhalt zu erhöhen, z.B. durch die Aufhebung bzw. Verringerung eines Standortnachteils. Eine effektive Maßnahme auf einem für den Rückhalt günstigen Standort wird mit „+++“ als sehr positiv gekennzeichnet, da diese die Wasserretention in besonderem Maße erhöht.

Folgende Werteeinheiten können nun je Maßnahme für einen Standort addiert werden:

„+++“	...	5 Werteeinheiten,
„++“	...	3 Werteeinheiten,
„+“	...	1 Werteeinheit,
„0“	...	0 Werteeinheiten,
„-“	...	Maßnahme wird ausgeschlossen (nur Maßnahme „Tiefenlockerung“).

Erreicht die so ermittelte Summe einen Wert von 20 und mehr, ist die Maßnahme als sehr gut anzusehen. Liegt der Wert unter 10, bescheinigt er eine geringe Wirksamkeit der Maßnahme auf dem gewählten Standort. Bei Maßnahmenkombinationen können die Gesamtwerte jedoch nicht einfach addiert werden. Um sicherzustellen, dass sich die gewählten Maßnahmen gegenseitig nicht negativ beeinflussen, ist eine sachliche Prüfung erforderlich.

## 5 Erläuterung der Bodeneigenschaften in Kombination mit landwirtschaftlichen Hochwasserrückhaltmaßnahmen

### 5.1 Bodenart

Die Bodenart beschreibt die Korngrößenzusammensetzung eines Feinbodens (Korngrößen  $\leq 2$  mm). Generell haben Böden mit größerer Körnung Poren mit größeren Durchmessern. Dies geht mit einer höheren Leitfähigkeit, aber auch mit einer geringeren Retention von Bodenwasser gegenüber der Schwerkraft (Feldkapazität) einher.

Als echter Rückhalt in den Bodenporen steht die nutzbare Feldkapazität zur Verfügung. Sehr kleine Poren (Totwasseranteil) sind nahezu immer mit Wasser gefüllt und können nur in Extremsituationen entleert werden, die in mitteleuropäischen Mittelgebirgen praktisch nicht auftreten. Sehr große Poren (Luftkapazität) werden zwar schnell mit Wasser gefüllt, aber auch schnell wieder entleert und bieten somit nur eine geringe Abflussverzögerung, aber keinen echten Rückhalt. Vereinfacht lässt sich festhalten:

Sande:	größte Korngrößen (0,063–2 mm) → hohe Wasserleitfähigkeit (Infiltrabilität) → geringes Wasserhaltevermögen → geringe nutzbare Feldkapazität
Schluffe:	mittlere Korngrößen (2–63 $\mu$ m) → mittlere Wasserleitfähigkeit (Infiltrabilität) → mittleres Wasserhaltevermögen → hohe nutzbare Feldkapazität
Tone:	kleine Korngrößen ( $< 2$ $\mu$ m) → geringe Wasserleitfähigkeit (Infiltrabilität) → hohes Wasserhaltevermögen → mittlere/geringe nutzbare Feldkapazität
Lehme:	Sonderfall Mischung aus allen drei Kornfraktionen → mittlere Wasserleitfähigkeit (Infiltrabilität) → mittleres/hohes Wasserhaltevermögen → hohe nutzbare Feldkapazität

Hinsichtlich der landwirtschaftlichen Hochwasserrückhaltmaßnahmen sind Tonböden aufgrund ihrer geringen Leitfähigkeit wenig geeignet. Bei Tiefenlockerungen besteht sogar die Gefahr, dass nach dem Setzen des gelockerten Materials die Lagerung kompakter ist als vor der Maßnahme, so dass sich der Hochwasserrückhalt verschlechtert. Konturnutzung hingegen kann den zu erwartenden Oberflächenabfluss auf Tonböden zurückhalten.

Sande können viel Wasser infiltrieren, geben dies aber auch relativ schnell wieder ab. Maßnahmen wie z.B. Entsieglung, die der reinen Infiltrationswiederherstellung dienen, sind positiv zu bewerten. Konturnutzung bei Sanden ist eher unwirksam, da nur wenig Oberflächenabfluss zu erwarten ist.

Lehm- und Schluffböden werden durch die genannten Maßnahmen am stärksten zum Hochwasserrückhalt ertüchtigt. Maßnahmen der Gruppe II und der Anbau von Zwischenfrüchten stellen neben dem Erhalt der Infiltrationswege auch eine ganzjährige Vegetationsdecke und somit eine zusätzliche Ausschöpfung des Bodenspeichers zur Verfügung und werden deshalb als sehr positiv bewertet. Bei der Umwandlung in Extensivgrünland können Moos- und Wurzelfilzaufgaben auftreten (FEGGER 2002, SCHOBEL et al. 2005). Demnach ist die pflanzensoziologische Entwicklung des extensivierten Grünlandes einzuschätzen und gegebenenfalls Pflegemaßnahmen mit einzubeziehen, da sonst die Gefahr der Förderung einer kontraproduktiven Maßnahme besteht.

### 5.2 Skelettgehalt – Grobbodenanteil

Der Grobbodenanteil (Korngrößen  $> 2$  mm) wird in der Bodenkartierung gesondert ausgewiesen. Diese Bodenanteile (Kiese, Gruse, Gerölle, Schutte) haben jedoch großen Einfluss auf den Standortwasserhaushalt. Mit steigendem Grobbodenanteil steigt die Wasserleitfähigkeit des Bodens, der Wasserrückhalt wird jedoch geringer.

Die Maßnahme „Tiefenlockerung“ ist auf Böden mit hohem Grobbodenanteil unwirksam, da keine Sperrriegel errichtet werden können. Auch die Wirkung der anderen Maßnahmen nimmt mit zunehmendem Grobbodenanteil ab. Es erscheint ohnehin unwahrscheinlich, dass Böden mit einem sehr hohen Skelettgehalt in den sächsischen HWEGen landwirtschaftlich genutzt werden. Einzig die Maßnahme „Entsieglung“ erreicht auch bei Böden mit hohem Skelettgehalt eine entscheidende Erhöhung des Hochwasserrückhalts.



### 5.3 Gründigkeit

Die Gründigkeit beschreibt die Mächtigkeit des Lockermaterials, das von Pflanzen ohne Schwierigkeiten durchwurzelt werden kann. Maßnahmen, die dem Erhalt oder der Verbesserung der vertikalen Fließwege dienen, wirken mit zunehmender Bodenmächtigkeit immer besser. Sehr positiv werden Maßnahmen bewertet, die zusätzlich tiefreichende Durchwurzelung (z.B. extensives Grünland, Energieholzplantagen) ermöglichen, so dass tief liegende Bodenschichten auch durch Transpiration ausgeschöpft werden. Auch die Entsiegelung tiefgründiger Böden wird als sehr positiv bewertet. Konturnutzung erscheint auf flach bis mittelgründigen Böden sinnvoller, da die dort anfallenden Oberflächenabflussmengen höher sein dürften.

### 5.4 Hangneigung

Diese Eigenschaft ist die einzige in der Matrix, die nicht direkt aus der kartierten Bodenform abzuleiten ist, auch wenn Bodenformen meist unmittelbar an bestimmte Landschaftspositionen gekoppelt sind. Für die Maßnahme „Konturnutzung“ gilt, dass die Effektivität mit zunehmender Hangneigung zunimmt. Die größte Effizienz zeigt diese Maßnahme bei einer Hangneigung von 3–8° (SCHWERTMANN et al. 1990). Bei einer Überschreitung dieser Neigung besteht die Gefahr, dass die Furchen brechen und wegen der Konzentration des Oberflächenabflusses an der Bruchstelle noch größeren Schaden anrichten. Bei stärker geneigten Flächen wird ohnehin von ackerbaulicher Nutzung abgeraten, so dass der Eintrag in der Entscheidungsmatrix nur theoretischen Wert hat.

Der zusätzliche Hochwasserrückhalt von infiltrationsfördernden Maßnahmen nimmt natürlich mit zunehmender Hangneigung ab. Maßnahmen, die eine ganzjährige Pflanzendecke gewährleisten, sollen hier aber positiver bewertet werden als die anderen, da der zusätzliche Erosionsschutz den Verbleib des Bodens als Rückhaltemedium gewährleistet. Ausgenommen davon ist die Extensivierung von Grünlandflächen, da hierbei eine ganzjährige Pflanzendecke bereits den Ausgangszustand darstellt.

### 5.5 Verschlammungsneigung des Bodensubstrats

Böden mit hohem Grobschluff- und Feinstsandanteil (Korndurchmesser 20 bis 125 µm) neigen zur Verschlammung. Die KA5 (AD-HOC-AG BODEN 2005) schlägt verschiedene Stufen der Verschlammbarkeit von Substraten vor. Um die Entscheidungsmatrix nicht zu komplex werden zu lassen, sollen alle Substrate mit Verschlammungsneigung in der Klasse „neigt zur Verschlammung“ zugeordnet werden.

Im Einzelnen sind dies folgende Körnungsklassen:

Lehmschluffe (lu):	Uls, Ut3, Ut2,
Sandschluffe (su):	Uu, Us,
Schluffsande (us):	Su3, Su4,
einige Lehmsande (ls):	Su2, Sl2, Sl3,
einige Tonschluffe (tu):	Ut4, Lu,
Feinsande:	fS, ffS
ein Sandlehm (sl):	Slu

Alle anderen Substrate werden als nicht verschlammbar angesehen. Da bei Direktsaatverfahren die Pflanzenreste nach der Ernte auf dem Feld verbleiben und sich häufig zusätzlich eine Bodenvegetation (Flechten u.ä.) bildet, ist ein gewisser Schutz vor der kinetischen Energie von Regentropfen gegeben. Diese Maßnahme

wird als positiv bewertet. Maßnahmen, die auf verschlammbaren Böden den Hochwasserrückhalt deutlich erhöhen, sind Maßnahmen, welche gegenüber dem Ausgangszustand eine ganzjährige Pflanzendecke oder anderen Schutz (Mulch) etablieren:

- Mulchsaatverfahren, Zwischenfruchtanbau und Untersaaten, Direktsaatverfahren,
- Flächenstilllegung,
- Umwandlung von Acker in Extensivgrünland,
- Anlage mehrjähriger Kulturen (z.B. Energiegehölze).

Diese sollen hier als sehr positiv bewertet werden.

### 5.6 Stauhorizont

Für Böden ohne Stauhorizont sind die Maßnahmen als gleichwertig anzusehen – hinsichtlich des betrachteten Bodenparameters und der zu erwartenden Steigerung des Hochwasserrückhaltes. Ist ein Stauhorizont vorhanden, kann eine Tiefenlockerungsmaßnahme mit der genannten Anschlussbewirtschaftung einen erheblich höheren Rückhalt bewirken (sehr positiv). Überjährige Pflanzendecken (v.a. Energieholzplantagen oder Extensivgrünland) haben außerdem das Potential, mit Tiefwurzeln die Stauschicht zu durchbrechen und den Hochwasserrückhalt dadurch zu erhöhen (positiv). Ganzjährige Pflanzenbedeckung ohne Tiefwurzler (Zwischenfrucht, teilweise Direktsaat) kann diesen Effekt nur bei oberflächennahem Stauwasser erzielen.

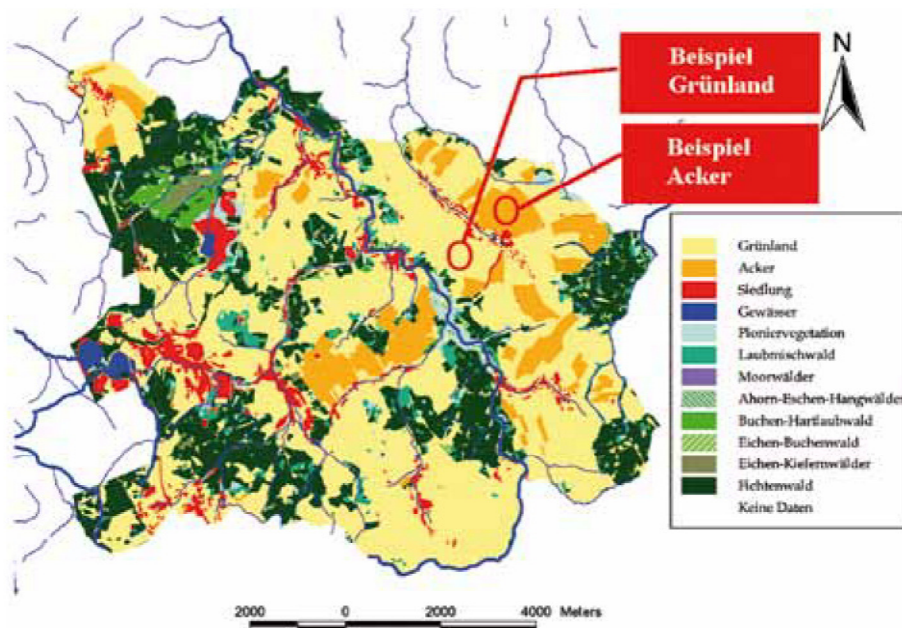
### 5.7 Grundwasser

Grundwasser ist in den HWEgen in ebenen Lagen, an Hangfüßen oder in Flussnähe zu erwarten. Grundwasserferne Standorte werden für alle Maßnahmen als gleichwertig betrachtet. Eine ganzjährige Pflanzendecke kann auf grundwassernahen Standorten zu einem erhöhten Hochwasserrückhalt führen, da der Wasserverbrauch häufig zu einem Absinken des Grundwasserspiegels führt. Für grundwasserbeeinflusste Standorte gilt dies nur für tiefwurzeln Pflanzenarten. Tiefenlockerung auf grundwassernahen und grundwasserbeeinflussten Standorte ist nicht zu empfehlen.

## 6 Anwendungsbeispiel der Bewertungsmatrix

Exemplarisch soll hier die vereinfachte Ermittlung (nach Tab. 2) geeigneter dezentraler, präventiver Maßnahmen auf zwei Flächen im HWEG Altenberg-Geising dargestellt werden. Abbildung 2 zeigt die Landnutzungsverteilung, welche durch Grünland dominiert ist. Eigenschaften der dort vorkommenden 15 Bodentypen und 49 Bodenformen wurden entsprechend der Bodenkonzepkarte (BKKONZ 1:25.000, 2005) analysiert und aggregiert. Für dieses Gebiet lässt sich feststellen, dass ackerbauliche Nutzung ausschließlich auf Braunerde-Standorten stattfindet. Die landwirtschaftliche Nutzung ertragsärmerer Standorte erfolgt in Form von Grünlandbewirtschaftung.

In Tabelle 3 ist das Ergebnis der semi-quantitativen Bewertung potentieller Maßnahmen für beide Standorte aufgeführt. Maßnahmen, die auf Standorten nicht relevant sind, wurden nicht in das Bewertungsverfahren einbezogen. Für beide Standorte kann die Anlage mehrjähriger Pflanzen empfohlen werden, wobei die oben angeführten Einschränkungen zu beachten sind. Für die Grünlandfläche erhält die Flächenstilllegung eine gleich hohe Bewertung wie die Anlage mehrjähriger Kulturen, für die Acker-



**Abbildung 2**  
Landnutzung im HWEG Altenberg/ Geising (LFULG 2009b, 03.12.2009)  
*Land uses in the flood-generating area Altenberg/Geising*

fläche gilt dies für die Umwandlung in Extensivgrünland. Die zu erwartende Verbesserung des Rückhaltes ist natürlich bei der Umwandlung der Ackerfläche höher, da die Ausgangssituation bei der Grünlandnutzung vergleichsweise besser ist. Ebenfalls hohe Bewertungen erreichen die Anwendung der Direktsaat/ konservierenden Bodenbearbeitung auf der Ackerfläche. Um

in Sachsen gesetzlich festgeschriebene Erhalt des Versickerungs- und Wasserspeichervermögens der Böden in HWEGen schreibt adäquate Ausgleichsmaßnahmen im Verschlechterungsfall vor. Soll der Ausgleich durch landwirtschaftliche Maßnahmen erfolgen, benötigt der amtliche Vollzug einen praxistauglichen Ansatz zur Bewertung besonders zur Identifizierung von Prioritätsflächen.

das Ergebnis abzusichern, wird eine quantitative, modellgestützte Auswertung in Kombination mit der Aufnahme von Bodeninformationen im Feld empfohlen. Darüber hinaus ist eine Flankierung der Maßnahme durch punktuell wirksame oder Oberflächenabfluss bremsende Maßnahmen möglich.

## 7 Folgen für den praktischen Einsatz

Der natürliche Hochwasserrückhalt in der Fläche hat sein größtes Potenzial bei hochwachsender, tiefwurzelnder, dichter, ganzjähriger Vegetationsbedeckung auf unverdichtetem Bodengefüge. Dauerhaft konservierende Bodenbearbeitung bzw. Direktsaat in Verbindung mit konsequentem Zwischenfruchtanbau und Belassen von Stroh auf Ackerflächen können aber auch wirksam zum Hochwasserrückhalt beitragen, besonders wenn eine ackerbauliche Nutzung der betrachteten Fläche weiterhin erwünscht ist. Der

Im Einzelfall wäre eine detaillierte modellgestützte Bewertung (Quantifizierungsansatz) wünschenswert, jedoch ist ein solch detailliertes aber auch aufwändiges Vorgehen in der Praxis in der Regel nicht umsetzbar. Vor diesem Hintergrund ermöglicht das vorgestellte Bewertungskonzept eine Bewertung der standort-spezifischen Wirksamkeit von Ausgleichsmaßnahmen mittels geringen personellen und finanziellen Mitteleinsatzes auf der Grundlage allgemein verfügbarer Flächeninformation. Es kann somit ein nützliches Werkzeug zur Flächen- und Maßnahmenauswahl sein.

Die Wirkung von Landnutzungsänderungen und angepassten landwirtschaftlichen Bewirtschaftungsmaßnahmen zum dezentralen Hochwasserschutz ist begrenzt. Sie wirken hauptsächlich bei kleinen und mittleren Hochwasserereignissen. In Verbindung zu anderen Schutzziele weisen aber viele dieser Maßnahmen des dezentralen Hochwasserschutzes eine Reihe von Synergieeffekten auf. Hierbei sind besonders Bodenschutz, Erosionsschutz, aber auch Trinkwasserschutz und Naturschutz zu nennen. Die Umwandlung von Acker- bzw. Grünland-

**Tabelle 3**  
Ergebnis der Ausgleichsmaßnahmenbewertung für die Beispielstandorte nach dem in LFULG (2010) vorgeschlagenen Schema  
*Assessment of flood-reducing compensation measures with the proposed scheme*

Maßnahmen	Werteinheiten	
	Acker (Boden-AGGNR: 1.274 m)	Grünland (Boden-AGGNR: 1.541 m)
<b>Bodenbearbeitung und Bestellverfahren</b>		
Direktsaatverfahren	17	–
dauerhaft konservierende Bodenbearbeitung und Mulchsaatverfahren	17	–
Maßnahmen zur Vermeidung von Bodenverdichtung	15	15
Konturnutzung	13	–
Tiefenlockerung mit nachfolgender bodenschonender Bewirtschaftung plus unterirdische Sperrriegel	15	–
Zwischenfruchtanbau und Untersaaten	17	–
<b>Nutzungsänderung</b>		
Flächenstilllegung	15	17
Entsiegelung	–	–
Umwandlung von Acker in Extensivgrünland	19	–
Extensivierung von Intensivgrünland	–	16
Anlage mehrjähriger Kulturen (z.B. Energiegehölze)	19	17



flächen in Waldflächen ist dabei in dieser Untersuchung noch nicht als Maßnahme aufgeführt, da oft der rechtliche Statusunterschied zwischen Agrarflächen und Wald die Flächenumwidmung behindert. Waldflächen können bei bodenschonender Bewirtschaftung für alle genannten Schutzziele Vorteile bedeuten (SCHMIDT et al. 2008), entsprechende Langzeituntersuchungen gibt es aber nur sehr eingeschränkt. Während für Siedlungsflächen schon Ausgleichsansätze bestehen (oft Anlage von Rückhaltebecken) und der hier gezeigte Ansatz als Grundlage der Bewertung von Acker- und Grünlandflächen dient, wird Wald prinzipiell als hochwassermindernd angesehen. Dabei ist aber zu beachten, dass unterschiedliche Waldbewirtschaftung, insbesondere Baumartenwahl und Waldstruktur, einen erheblichen Einfluss auf die Entstehung bzw. Retention von Hochwasser haben (z.B. SCHÜLER et al. 2007). Gerade hier besteht noch weiterer Forschungsbedarf (vgl. PILAŠ et al. 2010).

Aufgrund der Auswahlkriterien sind HWEge a priori Gebiete mit geringem Rückhalt, welche z.B. häufig geringmächtige oder verdichtete Böden (oft mit Stauhorizonten) aufweisen oder durch die Gebirgslage eine Vielzahl stark geneigter Flächen beinhalten. Da sich die Abgrenzung der HWEge jedoch auch an administrativen Grenzen orientiert, können auch Böden mit hohem potentiellen Rückhaltevermögen im Gebiet liegen. Diese gilt es zum einen besonders zu schützen und zum anderen bei der Umsetzung von Ausgleichsmaßnahmen besonders zu berücksichtigen. Das vorgestellte Bewertungssystem ist geeignet, diese Flächen im behördlichen Vollzug schnell zu identifizieren.

## 8 Zusammenfassung

Mit der Ausweisung von HWEgen besteht in Sachsen deutschlandweit eine einzigartige Schutzkategorie, welche besonders in den Mittelgebirgslagen den verschärfenden anthropogenen Einfluss auf die Hochwasserentstehung minimieren kann. Die tatsächliche Bewertung der hochwasserrelevanten Änderung einer Fläche nach einem Eingriff ist jedoch schwierig, besonders da die Aussagen im behördlichen Vollzug vergleichbar und umsetzungsorientiert sein müssen. Das hier vorgestellte Konzept für die Kompensation auf landwirtschaftlich genutzten Flächen enthält einerseits einen praxisnahen Ansatz, der mit allgemein verfügbaren Rauminformationen effizient die Flächen- und Maßnahmenauswahl unterstützt. Andererseits kann mit einer detaillierten Verschlechterungsbewertung, orientiert am Vorbild des Naturschutzrechts, auch die Eignung und der Flächenbedarf einer geplanten Kompensationsmaßnahme bewertet werden. Gleichzeitig besteht jedoch kein Zweifel daran, dass die durch die Inanspruchnahme einer Fläche (z.B. durch Bebauung) bedingte Verringerung des Wasser-rückhalts durch landwirtschaftliche Maßnahmen auf anderen Flächen nicht immer kompensiert werden kann. Als eine Kompensation baulicher Eingriffe wären daher auch wirksamere Maßnahmen wie Aufforstung oder Entsiegelung oder technische Maßnahmen zu prüfen.

## Summary

With the declaration of flood-generating areas Saxony established a unique protection category that can help to avoid the anthropogenic intensification of an increased flood generation, especially in mountainous areas. The well-founded and legally

binding assessment of an increased flood risk resulting from changes in land-use is difficult. The newly introduced two-step concept first applies a simple assessment-matrix using general spatial site information. The second step is then a quantifying approach. The applicability of measures and the area sizes required are evaluated by a detailed procedure based on a compensation scheme which is similar to the one practiced under nature-protection legislation. There is no doubt that decreasing water-storage capacity resulting from re-dedication of agricultural areas (e.g. for urban development) cannot be generally compensated by modified agricultural practices elsewhere. However, compensation might be achieved in such cases by more efficient measures such as afforestation or opening-up of impervious land surfaces.

## Anschriften der Verfasser:

Dipl.-Hydrol. A. Wahren  
Dipl.-Geogr. S. Frank  
Prof. Dr. K.H. Feger  
Technische Universität Dresden  
Institut für Bodenkunde und Standortslehre  
Fakultät Forst-, Geo- und Hydrowissenschaften  
Pienner Str. 19, 01737 Tharandt  
wahren@forst.tu-dresden.de

Dipl.-Hydrol. P. Walther  
Sächsisches Landesamt für Umwelt,  
Landwirtschaft und Geologie  
Fachbereich Wasser, Wertstoffe; Landeshochwasserzentrum  
Postfach 80 01 32, 01101 Dresden

Dr. W. Schmidt  
Sächsisches Landesamt für Umwelt,  
Landwirtschaft und Geologie  
Abteilung 7 – 1, Pflanzliche Erzeugung 2  
Gustav-Kühn-Str. 8, 04159 Leipzig

## Literaturverzeichnis

- AD-HOC-AG BODEN (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung (KA5). – Hrsg. Bundesanstalt für Geowissenschaften in Zusammenarbeit mit den staatlichen geologischen Diensten der Bundesrepublik Deutschland, Hannover. 5. Aufl., 438 S.
- AKKERMANN, M. (2004): Beurteilung des Einflusses einer angepassten Ackernutzung auf den Hochwasserabfluss. – Dissertation Universität Hannover
- ARMSTRONG, A.C. & E.A. GARWOOD (1991): Hydrological consequences of artificial drainage of grassland. – *Hydrological Processes* 5, 157–174
- BNATSCHG (2010): Bundesnaturschutzgesetz. Gesetz über Naturschutz und Landschaftspflege. Erste Version 14.05.1967, aktualisiert 01.03.2010, Bundesgesetzblatt 1/2010, 2.542 S.
- BKKONZ 1:25000 (2005): Bodenkonzepkarte im Maßstab 1:25.000. Erstellt durch Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie; Fachbereich Natur, Landschaft, Boden. Identifikator der Datenquelle: UDK-Sach-



sen:BE6819D4-AED8-4607-B777-73A87A4B202F

BRONSTERT, A., S. SEIERT & G. OBERHOLZER (1993): Maßnahmen der Flurbereinigung und ihre Wirkungen auf das Abflußverhalten ländlicher Gebiete. – Gemeinsamer Bericht des Instituts für Hydrologie und Wasserwirtschaft der Universität Karlsruhe und des Instituts für Liegenschaftswesen, Planung und Bodenordnung der Bundeswehruniversität München. Schriftenreihe des Landesamts für Flurneuordnung und Landentwicklung Baden Württemberg, H. 3, Kornwestheim

BRUNS, E. & J. KÖPPEL (2003): Handlungsempfehlung zur Bewertung und Bilanzierung von Eingriffen im Freistaat Sachsen. – Im Auftrag des Sächsischen Staatsministeriums für Umwelt und Landwirtschaft, Dresden

FEDERER, C.A. (1995): BROOK90: A simulation model for evapotranspiration, soil water, and streamflow, Version 3.1. Computer freeware and documentation. – USDA Forest Service, PO Box 640, Durham NH 03824, USA. <http://users.rcn.com/compassbrook/compassb.htm>

FEGER, K.H. (2002): Zusammenhänge zwischen Landnutzung, Bodeneigenschaften und Entstehung von Hochwässern in Flusseinzugsgebieten des Osterzgebirges. – In: A. Erler (Hrsg.): Wilde Weißeritz. – Tharandt. Findus, 118-129

KLEEBERG, H.-B. (1999): Zum Problem der Regionalisierung in der Hydrologie. – In: Kleeberg, H.-B., W. Mauser, G. Peschke & U. Streit (Hrsg.): Hydrologie und Regionalisierung. – Wiley-VCH, 3–12

KAO, I. (1980): Environmental assessment of water control structures in the Grand River basin. – IAHS 130, 209–214

LEICHT, H. (2008): Dezentraler Hochwasserschutz am Beispiel der Windach. – In: Disse, M., M. Kalk & W. Rieger (Hrsg.): Wasserrückhalt in der Fläche – Möglichkeiten und Grenzen des dezentralen Hochwasserschutzes. – Institut für Wasserwesen der Bundeswehr Universität München, Mitteilungen 100, 135–140

LFULG (2008): 10. Fachsymposium „Umwelt und Raumnutzung“. – Tagungsband. Dresden

LFULG (2009a): Wasserrückhaltepotenziale in Sachsen. – Abschlussbericht zum Teilprojekt II. Leipzig

LFULG (2009b): Color-Infrarot-(CIR-) Biotoptypen- und Landnutzungskartierung 1992/1992, Maßstab 1:10.000; <http://www.smul.sachsen.de/umwelt/boden/13075.htm>, 03.12.2009

LFULG (2010): Leitfaden für Ausgleichsmaßnahmen auf landwirtschaftlichen Flächen in Hochwasserentstehungsgebieten (HWE). – Dresden

MÜNCH, A. (2008): AKWA-M® - Teilflächenbasiertes Wasserhaus-

halts- und Hochwassermodell. – Dr. Dittrich & Partner Hydro-Consult GmbH Bannewitz, Programm und Dokumentation

PICHLER, A., T. DEPPE & V. JACKSON (2009): Risk assessment and risk management: Effectiveness and efficiency of non-structural flood risk management measures. – CRUE Research Funding Initiative Synthesis Report No I-2009. – CRUE, London

PILAŠ, I., K.H. FEGER, U. VILHAR & A. WAHREN (2011): Multidimensionality of Scales and Approaches for Forest–Water Interactions. – In: Bredemeier, M., S. Cohen, D.L. Godbold, E. Lode, V. Pichler & P. Schleppi (Eds.): Forest Management and the Water Cycle – An Ecosystem-Based Approach. – Ecological Studies 212, 351–380

REINHARDT, CH., J. BÖLSCHER, M. RAMELOW, R. WENZEL & A. SCHULTE (2009): Alternatives in flood protection: The effect of decentralized measures in the Upper Flöha watershed (SE Germany). – WIT Transactions on Ecology and the Environment 124

RICHERT, E., H. HEILMEIER, S. BIANCHIN, J. MATSCHULLAT, C. SEIDLER, M. MERTA & G. HAMMER (2007): Hochwasser und Naturschutz im Weißeritzkreis (HochNatur). – Abschlussbericht zum DBU Projekt 21278, IÖZ, TU Bergakademie Freiberg

RIEGER, W. & M. DISSE (2009): Prozessnahe Simulation von landwirtschaftlichen Bewirtschaftungsmaßnahmen und Landnutzungsänderungen als Nachweisinstrument für den dezentralen Hochwasserschutz. – Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 26, 137–142

SAMUELS, P., F. KLIJN, A. KORTENHAUS & P. SAYERS (2009a): FLOODsite Final Report – Volume 1: Advancement in Knowledge and Understanding. – HR Wallingford, UK, Project Contact No: GOCE-CT-2004-505420, 85 S.

SAMUELS, P., D. RAMSBOTTOM & J. SCHANZE (2009b): FLOODsite Final Report – Volume 2: Overview of the FLOODsite Pilots. – HR Wallingford, UK, Project Contact No: GOCE-CT-2004-505420, 78 S.

SÄCHSWG (Sächsisches Wassergesetz) vom 18. Oktober 2004, SächsGVBl. 2004, 482 S.

SCHMIDT, P.A., E.-G. WILHEM & D.-R. EISENHAEUER (2008): Waldbehandlung, Waldmehrung und Auengestaltung unter Berücksichtigung von Hochwasservorsorge und Naturschutz im Osterzgebirge. – Abschlussbericht zum DBU-Projekt „Hochwasserschutz- und naturschutzgerechte Behandlung umweltgeschädigter Wälder und Offenlandbereiche der Durchbruchtäler des Osterzgebirges“. Dresden

SCHOBEL, S., B. HEYEN, M. VOHLAND & D. SCHRÖDER (2005): Hochwassergefährdung durch extensive Grünlandnutzung? – Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft 107, 587–588

- SCHÜLER, G., I. GELLWEILER & S. SEELING (Hrsg.) (2007): Dezentraler Wasserrückhalt in der Landschaft durch vorbeugende Maßnahmen der Waldwirtschaft, der Landwirtschaft und im Siedlungswesen. Das INTERREG III B NWE Projekt WaReLa – Ergebnisse aus drei Jahren Umsetzung und Forschung für einen nachhaltigen Hochwasserschutz in der Fläche. – Mitteilungen aus der Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz 64, 354 S.
- SCHULLA, J. & K. JASPER (2007): Model Description WaSiM-ETH. Technical report, pp. 181; [www.wasim.ch/products/wasim\\_description.htm](http://www.wasim.ch/products/wasim_description.htm)
- SCHWERTMANN, U., W. VOGL & M. KAINZ (1990): Bodenerosion durch Wasser. Vorhersage des Abtrags und Bewertung von Gegenmaßnahmen. 2. Aufl. – Ulmer Verlag, Stuttgart
- SEIDEL, N. (2008): Untersuchung der Wirkung verschiedener Landnutzungen auf Oberflächenabfluss und Bodenerosion mit einem Simulationsmodell. – Dissertation. Fakultät für Geowissenschaften, Geotechnik und Bergbau, TU Bergakademie Freiberg
- SIEKER, F. (2007): Vorbeugender Hochwasserschutz durch Wasserrückhalt in der Fläche unter besonderer Berücksichtigung naturschutzfachlicher Aspekte am Beispiel des Flusseinzugsgebietes der Mulde in Sachsen. – Abschlussbericht zum DBU-Projekt AZ 21467. – In: Hochwasserschutz an der Mulde. Schriftenreihe der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft, H. 35, Leibnitz Universität Hannover
- SMI (2006): Vorsorgende Hochwasserschutzmaßnahmen durch transnationale Raumordnung für das Einzugsgebiet der Elbe – Ergebnisse und Handlungsvorschläge. Ergebnisse und Handlungsvorschläge. – Sächsisches Ministerium des Inneren, Lead-Partner des Interreg IIIB-Projektes ELLA (Elbe-Labe Spatial Planning Flood Management Strategy). Dresden. 44 S.
- VORDERBRÜGGE, T. & K. FRIEDRICH (1998): Thematische Bodenkarten als Grundlage der Landes- und Regionalplanung in Hessen. – Ökologieforum Hessen, Bodenschutz in der Landschaftsplanung, 16–23, Wiesbaden
- WAGNER, K., H. JANTSCHKE & J. NEUWIRTH (2009): Die Wechselwirkungen zwischen Landwirtschaft und Hochwasserrisiko. Ergebnisse des Projektes AWI/162/07. – Teilprojekt der Forschungskoooperation Flood Risk II des Lebensministeriums. Agrarpolitischer Arbeitsbeihilf Nr. 31 der Bundesanstalt für Agrarwirtschaft, Wien
- WAHREN, A., K.H. FEGER, K. SCHWÄRZEL, G. RÖMER, A. MÜNCH & I. DITTRICH (2008): Landnutzungsabhängiger Gebietsrückhalt bei Hochwasser auf der Grundlage sozioökonomisch begründeter Zukunftsszenarien. Tag der Hydrologie 2008: „Hochwasser, Wassermangel, Gewässerverschmutzung – Problemlösung mit modernen hydrologischen Methoden“. – Leibniz-Universität Hannover
- WAHREN, A., K. SCHWÄRZEL, K.H. FEGER & A. MÜNCH (2009): Land-use effects on flood generation – considering soil hydraulic measurements in modelling. – *Advances in Geosciences* 21, 99–107
- WISKOW, E. & R.R. VAN DER PLOEG (2003): Calculation of drain spacings for optimal rainstorm flood control. – *Journal of Hydrology* 272, 163–174
- WOHLRAB, B. (1992): Landschaftswasserhaushalt. Wasserkreislauf und Gewässer im ländlichen Raum; Veränderungen durch Bodennutzung, Wasserbau und Kulturtechnik. – Parey Verlag, Hamburg

## **Anhang 5:**

**WAHREN A., SCHWÄRZEL K., FEGER K.H. (2012): Potentials and limitations of natural flood retention by forested land in headwater catchments: evidence from experimental and model studies, J. Flood Risk Management 5, 321–335.**

Gesamter Artikel:

<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1753-318X.2012.01152.x/full>